



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

## INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

### DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

AUTOR: ALVARO ROLDAN ESCOLANO

TUTOR: MARIO SOROLLA AYZA

PAMPLONA

# **PROYECTO DE FIN DE CARRERA**

**TÍTULO: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA**

**AUTOR: Alvaro Roldán Escolano**

**TUTOR: Mario Sorolla Ayza**

**E.T.S.I.I. y TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA**

## **LISTA DE PALABRAS CLAVE**

Diseño, antena, wifi, microstrip, parche, radiocomunicaciones, linealidad, polarización circular, simulación, analizador de redes, dieléctrico, sustrato, diagrama de radiación, ganancia, acoplamiento, CST Microwave Studio.

## **RESUMEN**

En este proyecto se describe el diseño, construcción y medida de una antena impresa. La antena se diseña para sistemas WIFI a 2,45 GHz. El diseño se lleva a cabo con el programa de simulación electromagnética en 3 dimensiones CST Microwave Studio. Para empezar, se diseña, construye y se mide una antena de parche rectangular básica. A continuación se diseña otra antena igual añadiendo unas inserciones en el parche con las que se mejora la adaptación de la antena como se pretendía. Finalmente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos, junto con las limitaciones que se han encontrado en la realización de éste proyecto.

## **ABSTRACT**

In this Project is described the design, manufacture and measurement of patch antenna. The antenna is designed at 2.45 GHz for WIFI systems. The design is made with the software CST Microwave Studio. First a basic patch antenna is designed, fabricated and measured, then, a similar antenna is designed by etching two entries in the patch in such a way that the antenna matching is improved as expected. Later, it will be shown the analysis of the achieved results, and their limitations, during this project execution.

Alvaro Roldán Escolano

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b> |
| 1.1 MOTIVACIÓN .....  | 1        |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 1        |
| 1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA .....  | 1        |
| 1.4 DESCRIPCIÓN ANTENAS DE PARCHE, ORIGEN, UTILIDAD Y APLICACIONES<br>DEL DISEÑO UTILIZADO..... | 2        |
| 1.5 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA                                | 3        |
| 1.6 REFERENCIAS .....   | 3        |
| 1.7 BREVE VALORACIÓN .....  | 3        |
| <b>2 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE ANTENAS PARCHE.....</b>  | <b>4</b> |
| 2.1 INTRODUCCIÓN .....  | 4        |
| 2.2 BREVE RESEÑA HISTORICA.....   | 4        |
| 2.3 ANTENAS PARCHE .....  | 5        |
| 2.4 APLICACIONES DE LAS ANTENAS MICROSTRIP.....   | 5        |
| 2.5 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....  | 7        |
| 2.6 PARÁMETROS RELEVANTES .....   | 9        |
| 2.6.1 IMPEDANCIA.....   | 9        |
| 2.6.2 ADAPTACIÓN .....  | 9        |
| 2.6.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN .....   | 10       |
| 2.6.4 DENSIDAD DE POTENCIA .....  | 10       |
| 2.6.5 DIRECTIVIDAD .....  | 10       |
| 2.6.6 GANANCIA.....   | 10       |
| 2.6.7 EFICIENCIA.....   | 11       |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.6.8 POLARIZACIÓN .....  | 11        |
| 2.6.9 ANCHO DE BANDA .....  | 12        |
| 2.7 REFERENCIAS .....   | 12        |
| <b>3 LÍNEAS MICROSTRIP .....</b>  | <b>13</b> |
| 3.1 INTRODUCCIÓN .....  | 13        |
| 3.2 ORIGEN.....   | 13        |
| 3.3 TIPOS DE ONDAS EN LAS LÍNEAS MICROSTRIP.....  | 14        |
| 3.4 NECESIDADES PARA CIRCUITOS Y ANTENAS .....  | 17        |
| 3.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS MICROSTRIP .....   | 19        |
| 3.6 MÉTODOS DE ALIMENTACION.....  | 22        |
| 3.7 REFERENCIAS .....   | 25        |
| <b>4 MÉTODOS DE ANÁLISIS .....</b>  | <b>26</b> |
| 4.1 MODELO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....  | 26        |
| 4.2 MODELO DE CAVIDAD RESONANTE .....   | 27        |
| 4.3 SOLUCIÓN DE ONDA COMPLETA “FULL WAVE”: MÉTODO DE LAS<br>DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DE TIEMPO ..... | 28        |
| 4.4 CST MICROWAVE .....   | 30        |
| 4.4.1 INTRODUCCIÓN .....  | 30        |
| 4.4.2 MANEJO.....   | 32        |
| 4.4.3 NECESIDAD DEL CST MICROWAVE .....   | 35        |
| <b>5 DESCRIPCION EQUIPO DE MEDIDA. ....</b>   | <b>36</b> |
| 5.1 ANALIZADOR DE REDES.....  | 36        |
| 5.2 CALIBRACIÓN .....   | 37        |
| <b>6 PROCESO Y RESULTADOS.....</b>  | <b>38</b> |
| 6.1 INTRODUCCIÓN .....  | 38        |
| 6.2 STRIPLINE.....  | 38        |
| 6.3 PARCHE .....  | 40        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.4 DISEÑO DEFINITIVO.....                      | 41        |
| 6.5 FABRICACIÓN Y MEDIDA .....                  | 44        |
| 6.6 ANTENA CON HENDIDURAS .....                 | 48        |
| 6.7 COMPARACIÓN .....                           | 51        |
| 6.8 MEDIDA DIRECTIVIDAD .....                   | 54        |
| <b>7 COMPARACIÓN.....</b>                       | <b>57</b> |
| 7.1 ADAPTACIÓN.....                             | 57        |
| 7.2 EFICIENCIA Y DIRECTIVIDAD .....             | 60        |
| <b>8 CONCLUSIÓN Y VALORACIÓN ECONÓMICA.....</b> | <b>64</b> |
| 8.1 DISEÑO .....                                | 64        |
| 8.2 CST .....                                   | 64        |
| 8.3 CONTRUCCIÓN Y MEDIDA .....                  | 65        |
| 8.4 CONCLUSIÓN .....                            | 65        |
| 8.5 LÍNEAS FUTURAS .....                        | 65        |
| 8.6 VALORACIÓN ECONOMICA .....                  | 65        |
| <b>9 BIBLIOGRAFÍA .....</b>                     | <b>66</b> |

## 1 INTRODUCCIÓN

En el presente documento se describe el proyecto técnico de ingeniería para el diseño, la fabricación y la medida de una antena de parche impresa para sistemas WIFI. Éste proyecto se ha llevado a cabo en la Universidad Pública de Navarra. La antena se diseña para sistemas WIFI a la frecuencia de 2.450 MHz, que equivale a 2,45 GHz. El diseño se lleva a cabo de forma empírica con el programa de simulación electromagnética en 3 dimensiones CST Microwave Studio. Una estructura microstrip está hecha de un material aislante llamado sustrato dieléctrico completamente cubierto de metal por la parte inferior, llamado plano de masa, y parcialmente recubierto de metal por la parte superior donde el circuito o la antena están impresos. El proceso para conseguir el diseño definitivo consiste en probar sustratos y parches de diferentes tamaños y materiales hasta conseguir una gráfica de adaptación con un mínimo a la frecuencia de resonancia y unas propiedades de radiación adecuadas. Para empezar, se diseña, construye y se mide una antena de parche rectangular básica logrando unos resultados buenos para la adaptación pero no tanto para la eficiencia de radiación. A continuación se diseña otra antena igual añadiendo unas inserciones en el parche con las que se mejora la eficiencia de radiación y la adaptación de la anterior. Tras construir también la segunda antena se lleva a cabo una medida cualitativa de la directividad de la antena para compararla con la obtenida en la simulación. Tras esto se presenta el análisis y resultados obtenidos, junto con las limitaciones que se han encontrado en la realización de éste proyecto.

### 1.1 MOTIVACIÓN

A pesar de no haber estudiado teoría de antenas ni electromagnetismo en la carrera me pareció interesante la realización de éste proyecto dada la expansión experimentada por las comunicaciones inalámbricas. De este modo he podido ampliar mi horizonte de conocimientos en el ámbito de las radiocomunicaciones.

### 1.2 OBJETIVOS

Diseñar, construir y medir una antena de parche rectangular para WiFi que resuene a 2.45 GHz.

### 1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

#### -FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE ANTENAS Y PARÁMETROS RELEVANTES

Se describe brevemente la función y el origen de las antenas en general y de las antenas parche en particular. Se explican las múltiples aplicaciones de las antenas parche. Asimismo se explican los parámetros principales para comprender sus características.

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

---

## -LÍNEAS MICROSTRIP

Se detalla el origen de las antenas parche, su estructura y los fundamentos de su diseño.

## -MÉTODOS DE ANÁLISIS

En éste capítulo se describen brevemente los diferentes métodos de que disponemos para analizar las antenas parche y cómo el método de diferencias finitas que utiliza el software CST Microwave Studio constituye una ayuda esencial para diseñar una antena de parche.

## -DESCRIPCIÓN EQUIPO DE MEDIDA

En éste apartado se describe brevemente el analizador de redes vectorial Agilent 8722ES.

## -PROCESO Y RESULTADOS

En el siguiente capítulo se describen los pasos dados para llegar al diseño definitivo, los contratiempos que han surgido y se presentan los resultados obtenidos. Se describe también la mejora realizada en el diseño, los resultados obtenidos y se realiza una comparación de éstos con los obtenidos en el primer modelo.

## -VALORACIÓN BREVE DE LOS RESULTADOS Y VALORACIÓN ECONOMICA

En éste capítulo se presentan los resultados de las simulaciones de la antena realizada y los de su mejora, las medidas realizadas a las antenas ya construidas y se comparan. Se hace una valoración de la validez de los resultados, del trabajo realizado y del coste económico del proyecto.

## 1.4 DESCRIPCIÓN ANTENAS DE PARCHE, ORIGEN, UTILIDAD Y APLICACIONES DEL DISEÑO UTILIZADO

Las antenas son los componentes de los sistemas de comunicación diseñados específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, o dicho de otro modo los dispositivos encargados de adaptar las ondas guiadas, que se transmiten por conductores o guías a las ondas que se propagan en el espacio libre. Las antenas de tipo parche están basadas en la tecnología microstrip y su utilización está muy extendida para aplicaciones aeronáuticas, de aviación, para misiles, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas y para frecuencias de microondas y ondas milimétricas principalmente. El diseño realizado estaría destinado a comunicaciones inalámbricas del tipo WiFi.



## 1.5 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

El programa de simulación CST MICROWAVE STUDIO de la empresa CST (Computer Simulation Technology), es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en tres dimensiones de componentes de alta frecuencia, implementa métodos de análisis de tipo onda completa, concretamente el Método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD).

El analizador de redes utilizado ha sido el Agilent 8722ES, un instrumento de dos puertos que mide la transmisión compleja en el dominio de la frecuencia.

## 1.6 REFERENCIAS

Jean Francois Zürcher and Fred E. Gardiol, Broadband Patch Antennas, Artech House

David R.M. Pozar, Microwave and RF Design of Wireless Systems, Wiley (2000)

## 1.7 BREVE VALORACIÓN

La valoración personal es que es sencillo realizar el diseño de una antena de parche básica, aun con conocimientos de la materia limitados y conseguir que ésta tenga unas características técnicas aceptables. También me he dado cuenta que con retoques en la estructura se podría conseguir aumentar parámetros importantes como el ancho de banda o lograr que la antena radiara a dos frecuencias diferentes.

También he de admitir que estructuras más complejas significarán problemas más complejos.

## 2 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE ANTENAS PARCHE

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las antenas son los componentes de los sistemas de comunicación diseñados específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, o dicho de otro modo los dispositivos encargados de adaptar las ondas guiadas, que se transmiten por conductores o guías a las ondas que se propagan en el espacio libre. Los sistemas de comunicaciones utilizan antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de TV y radio, o recibir señales en equipos portátiles.

### 2.2 BREVE RESEÑA HISTORICA

Los primeros sistemas de comunicaciones eléctricos fueron el telégrafo (año 1844) seguido de la telefonía (1878). Las señales en estos sistemas eran enviadas a través de líneas de transmisión de hilos conductores conectando emisor y receptor.

La teoría de las antenas surge basándose en los desarrollos matemáticos de J.C.Maxwell (1854), los experimentos de H.R. Hertz (1887) y los primeros sistemas de radiocomunicaciones de G.Marconi (1897). Hasta los años 40 la tecnología de las antenas se centra en elementos radiantes de hilo, a frecuencia hasta UHF, al principio del todo trabajan con frecuencias de transmisión de entre 50 y 100 KHz lo que les obligaba a utilizar antenas muy pequeñas comparadas con la longitud de onda, más tarde se pudo empezar a trabajar con frecuencias de hasta 1 MHz y aumentar el tamaño de las antenas. A partir de la Segunda Guerra Mundial se desarrollan nuevos elementos radiantes (guías de ondas, bocinas y reflectores) y sobretodo generadores de microondas (magnetron y klystron) que permiten trabajar a frecuencias superiores a 1 GHz. A partir de la década de los 80, los grandes avances en arquitectura y tecnología de computadores permitieron el análisis de estructuras inabordables por métodos analíticos. Se desarrollaron los métodos de los momentos, el de las diferencias finitas, etc. La introducción de los dispositivos de estado sólido ha permitido un enorme avance de radiocomunicaciones como las comunicaciones espaciales y la telefonía móvil. Las antenas han pasado de jugar un papel secundario en el diseño de un sistema de telecomunicaciones a jugar un papel crítico, a principios de siglo XX se utilizaban métodos de prueba error para depurar los diseños mientras que hoy en día se logra pasar del diseño teórico al prototipo final sin necesidad de pruebas intermedias.

## 2.3 ANTENAS PARCHE

Las antenas de tipo parche están basadas en la tecnología microstrip y su utilización está muy extendida para aplicaciones aeronáuticas, de aviación, para misiles, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas y para frecuencias de microondas y ondas milimétricas principalmente.

El origen de la tecnología microstrip son los striplines, una tira delgada de conductor en un dieléctrico recubierto en la parte superior e inferior por una capa metalizada (ambas con el mismo potencial, tierra). Data de los años 50 y supusieron una nueva forma de circuitería de microondas compatible con la tecnología de circuitos impresos. Su principal aplicación es la de realizar filtros, acopladores de línea paralelos de alta directividad, amplificadores, etc.

## 2.4 APLICACIONES DE LAS ANTENAS MICROSTRIP

Las antenas parche tienen múltiples aplicaciones principalmente en el mundo de la telefonía móvil y de las comunicaciones wireless debido principalmente a su bajo coste y un peso y volumen reducidos entre otras ventajas, por el contrario son antenas con un ancho de banda reducido y con poca potencia. [Tabla 2.1]

- ◆ Rango de frecuencias de 100 MHz a 50 GHz.
- ◆ Comunicaciones móviles (estaciones base, teléfono, automóvil). [Figura 2.1 y Figura 2.2]
- ◆ Aeronáutica: radares, comunicaciones, navegación, altímetro, sistemas de aterrizaje.
- ◆ Retransmisión de televisión en directo, radares de sensibilidad remotos, radiómetros.
- ◆ Náutica: comunicaciones, radar, navegación.
- ◆ Biomédicas.
- ◆ Telemetría (guiado de misiles, sensores).
- ◆ Observación de la tierra.
- ◆ Sistemas de vigilancia, identificación.

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

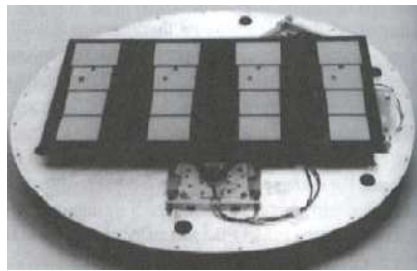


Figura 2.1 Comunicaciones móviles por satélite (agrupación de antenas con barrido mecánico)

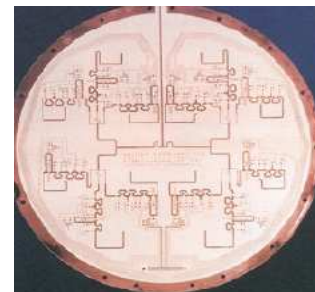
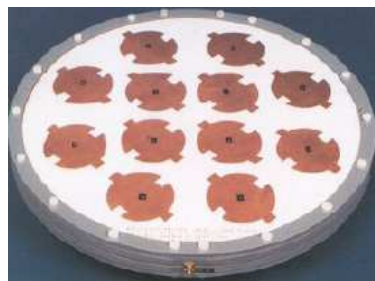


Figura 2.2 Comunicaciones móviles por satélite (agrupación de antenas con barrido electrónico).

| VENTAJAS:   | INCONVENIENTES:                                     |
|---|---|
| Peso y volumen reducidos                            | Alto Q ( $>50$ )                                    |
| Bajo coste  | Banda estrecha: 1% - 5%                             |
| Robustez (montado en superficies rígidas)           | Requieren sustratos de calidad                      |
| Facilidad de fabricación                            | Baja potencia                                       |
| Versatilidad (frecuencia, polarización y diagramas) | Impedancia de entrada difícil de calcular y ajustar |
| Fáciles de agrupar en arrays                        | Eficiencia reducida en arrays                       |
| Adaptables a superficies curvas                     |   |

Tabla 2.1 Ventajas e inconvenientes de las antenas parche.

## 2.5 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda, el conjunto de todas las frecuencias se llama espectro. [Figura 2.3] Están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la energía.

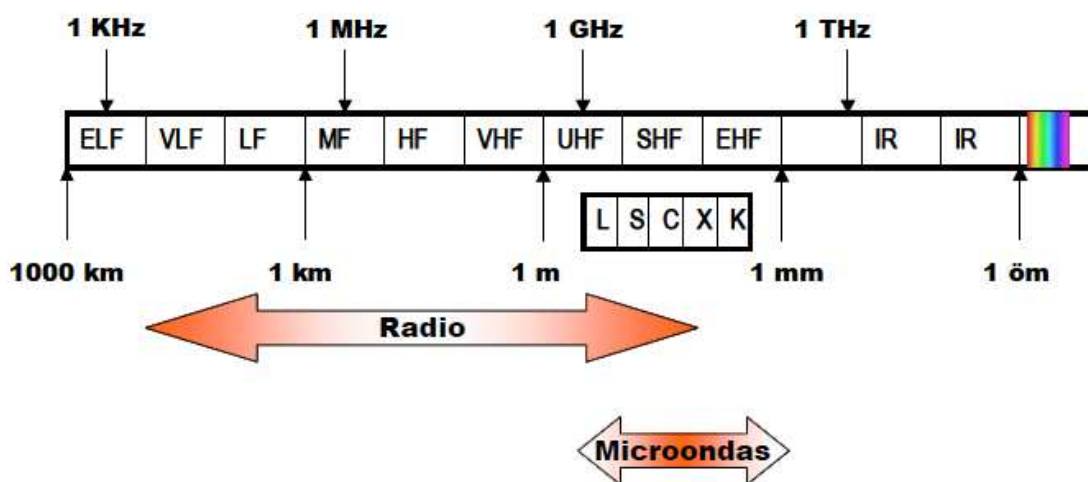


Figura 2.3 Espectro electromagnético.

Las ondas se clasifican por bandas, las denominaciones de las bandas de frecuencia se pueden realizar por décadas como por ejemplo MF, HF, VHF, UHF [Tabla 2.3]. A frecuencias de microondas se utilizan las bandas L, C, S, X [Tabla 2.2] que provienen de los primeros tiempos del radar.

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

| Banda | frec. mínima | frec. máxima | $\lambda$ máxima | $\lambda$ mínima |
|-------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| L     | 1 GHz        | 2 GHz        | 30 cm            | 15 cm            |
| S     | 2 GHz        | 4 GHz        | 15 cm            | 7.5 cm           |
| C     | 4 GHz        | 8 GHz        | 7.5 cm           | 3.75 cm          |
| X     | 8 GHz        | 12.4 GHz     | 3.75 cm          | 2.42 cm          |
| Ku    | 12.4 GHz     | 18 GHz       | 2.42 cm          | 1.66 cm          |
| K     | 18 GHz       | 26.5 GHz     | 1.66 cm          | 1.11 cm          |
| Ka    | 26.5 GHz     | 40 GHz       | 11.1 mm          | 7,5 mm           |
| mm    | 40 GHz       | 300 GHz      | 7.5 mm           | 1 mm             |

Tabla 2.2 Bandas de las frecuencias de microondas.

| Banda | Denominación             | frec. mínima | frec. máxima | $\lambda$ máxima | $\lambda$ mínima |
|-------|--------------------------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| ELF   | Extremely Low Frequency  | -            | 3 kHz        | -                | 100 km           |
| VLF   | Very Low Frequency       | 3 kHz        | 30kHz        | 100 km           | 10 km            |
| LF    | Low Frequency            | 30 kHz       | 300 kHz      | 10 km            | 1 km             |
| MF    | Medium Frequency         | 300 kHz      | 3 MHz        | 1 km             | 100 m            |
| HF    | High Frequency           | 3 MHz        | 30 MHz       | 100 m            | 10 m             |
| VHF   | Very High Frequency      | 30 MHz       | 300 MHz      | 10 m             | 1 m              |
| UHF   | Ultra High Frequency     | 300 MHz      | 3 GHz        | 1 m              | 10 cm            |
| SHF   | Super High Frequency     | 3 GHz        | 30 GHz       | 10 cm            | 1 cm             |
| EHF   | Extremely High Frequency | 30 GHz       | 300 GHz      | 1 cm             | 1 mm             |

Tabla 2.3 Décadas del espectro.

## 2.6 PARÁMETROS RELEVANTES

### 2.6.1 IMPEDANCIA

La impedancia de entrada de la antena se define como la relación entre tensión y corriente en sus terminales de entrada. Dicha impedancia es por lo general compleja, su parte real se denomina resistencia y su parte imaginaria se denomina reactancia.

En la impedancia de antena, la parte real  $R_a(\omega)$  y la parte imaginaria  $X_a(\omega)$  dependen ambas de la frecuencia, pudiendo expresarse como:

$$Z_a(\omega) = R_a(\omega) + jX_a(\omega) \quad (1)$$

Se define la resistencia de radiación como la relación entre la potencia total radiada por una antena y el valor eficaz de la corriente en sus terminales, elevada al cuadrado. Se define resistencia óhmica de una antena como la relación entre la potencia disipada por efecto de las pérdidas resistivas y la corriente en sus terminales al cuadrado. Por lo tanto la resistencia de antena la podemos considerar como la suma de la resistencia de radiación y la resistencia óhmica.

### 2.6.2 ADAPTACIÓN

En transmisión y recepción, la antena suele estar conectada a una línea de transmisión, o bien directamente al transmisor o bien al receptor. [Figura 2.4] Para medir el grado de reflexión de la potencia en una carga, se emplea el parámetro de dispersión  $S_{11}$  que nos da una idea de la transferencia de potencia hacia la antena. Dicho parámetro representa el coeficiente de reflexión en un bipuerto (la relación entre la onda reflejada respecto a la onda incidente) cuando la salida cuando no hay reflexión en la salida.

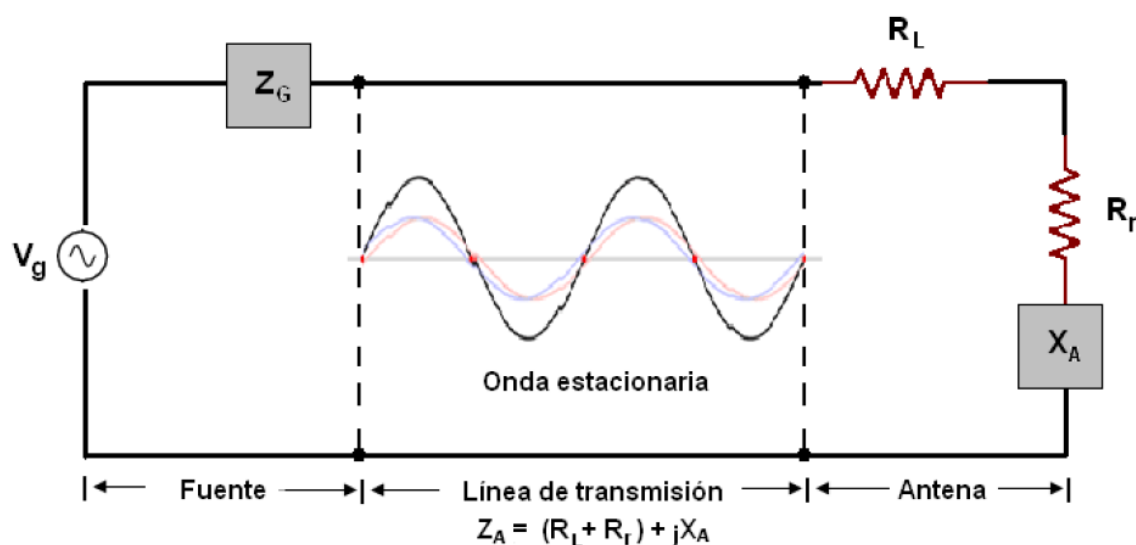


Figura 2.4 Esquema de la fuente de transmisión conectada a la antena.

La formula de la adaptación es:

$$S_{11} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2)$$

donde  $Z_A$  es la impedancia de entrada de la antena y  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea de transmisión conectada a la antena.

## 2.6.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN

El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades direccionales de radiación de la antena a grandes distancias. Ya que a grandes distancias el campo magnético es directamente proporcional al campo eléctrico, la representación podría desarrollarse a partir de éste último. En este sentido, el plano E (plano que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección) y el plano H (análogamente, plano formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección), constituyen los planos más representativos. Ambos planos son perpendiculares y su intersección define la dirección de máxima radiación de la antena.

## 2.6.4 DENSIDAD DE POTENCIA

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Se puede calcular a partir de los valores eficaces de los campos como:

$$\vec{P}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (3)$$

## 2.6.5 DIRECTIVIDAD

Podemos definir la directividad de la antena como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una distancia dada y la densidad de potencia, que radiaría a esa misma distancia, una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena. Si no se especifica la dirección angular se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección máxima de radiación.

## 2.6.6 GANANCIA

La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancia y potencia entregada a la antena. Mientras que en la definición de directividad se habla de potencia radiada por la antena en la definición de ganancia se



habla de la potencia que se le entrega a la antena, la diferencia entre ambas es la potencia disipada por la antena.

### 2.6.7 EFICIENCIA

La eficiencia se puede definir como la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma, o lo que es lo mismo la relación entre la ganancia y la directividad. La eficiencia está entre 0 y 1, si una antena no tiene pérdidas, la directividad y la ganancia son iguales. Se puede obtener también a partir de las resistencias de radiación y óhmicas teniendo en cuenta que es la relación entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena.

$$e = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{G}{D} \quad (4)$$

### 2.6.8 POLARIZACIÓN

La polarización de una antena es la polarización de la onda radiada por dicha antena en una dirección dada. La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada. Para ondas con variación sinusoidal dicha figura es en general una elipse. [Figura 2.5] Hay una serie de casos particulares. Si la figura trazada es una recta, la onda se denomina linealmente polarizada, si es un círculo circularmente polarizada. El sentido de giro del campo eléctrico, para una onda que se aleja del observador, determina si la onda está polarizada circularmente a derechas si éste coincide con el giro de las agujas del reloj o a izquierdas en caso contrario.

Hasta ahora hemos analizado la antena en relación a la densidad de potencia o la intensidad de los campos radiados, pero en cada punto del espacio existe un vector de campo

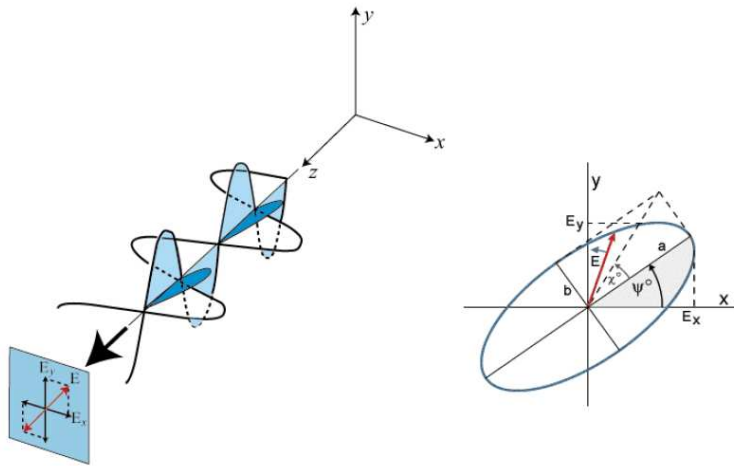


Figura 2.5 Diferentes trazos descritos por una onda electromagnética en el tiempo.

## 2.6.9 ANCHO DE BANDA

En general, las antenas están limitadas a funcionar bajo las especificaciones deseadas para un rango de frecuencias determinado y limitado. El rango de frecuencias para el que el comportamiento de la antena es similar, es decir, el rango en el que un parámetro de antena no sobrepasa un límite prefijado se conoce como ancho de banda.

$$BW = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \quad (5)$$

$f_{\max}$  y  $f_{\min}$  son las frecuencias que delimitan el rango de frecuencias donde se cumplen las especificaciones y  $f_0$  la frecuencia central.

## 2.7 REFERENCIAS

[2.6] **David R.M. Pozar**, Microwave and RF Design of Wireless Systems, **Wiley** (2000)

## 3 LÍNEAS MICROSTRIP

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Las antenas de tipo parche están basadas en la tecnología de líneas de transmisión o microstrip y su utilización está muy extendida para aplicaciones aeronáuticas, de aviación, para misiles, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas y para frecuencias de microondas y ondas milimétricas principalmente.

Lo extendido de su uso se debe a lo reducido de su tamaño y su poco peso, así como su adaptabilidad a superficies tanto planas como no planas por lo que se las denomina antenas de bajo perfil. Son sencillas de producir en masa (debido a que se pueden abaratar mucho los costes), fáciles de adaptar en circuitos integrados de microondas y versátiles en términos de impedancia, polarización, patrón y frecuencia de resonancia. Por el contrario su estructura no puede soportar altas potencias por lo que la radiación no puede ser muy potente, tienen baja eficiencia, son de banda estrecha, pérdidas relevantes y les afecta la temperatura.

Una estructura microstrip está hecha de una fina capa de un material aislante llamado sustrato dieléctrico. Éste material está completamente cubierto de metal por la parte inferior llamada plano de masa, y parcialmente recubierto de metal por la parte superior donde el circuito o la antena están impresos.

El sustrato dieléctrico es la base del circuito microstrip, constituye un soporte estable para las tiras conductoras y los parches que conforman las conexiones, los resonadores y las antenas. El sustrato también tiene la función de concentrar el campo electromagnético y prevenir en el circuito radiaciones no deseadas. La permitividad dieléctrica y grosor del sustrato determinan las características del circuito o la antena.

### 3.2 ORIGEN

El origen de la tecnología microstrip son los striplines, una tira delgada de conductor inmersa en un dieléctrico recubierto en la parte superior e inferior por una capa metalizada (ambas con el mismo potencial, tierra). Data de los años 50 y supusieron una nueva forma de circuitería de microondas realizar filtros, acopladores de línea paralelos de alta directividad, amplificadores, etc.

Al poco tiempo aparecieron las líneas microstrip que se diferencian de los striplines en la ausencia del sustrato superior dejando al aire la línea conductora, como consecuencia, estas estructuras tienen pérdidas por radiación, en particular cuando los sustratos son de baja permitividad. El uso de líneas de microstrip se generalizó debido a la facilidad de montaje superficial de componentes pasivos y activos. [Figura 3.1]

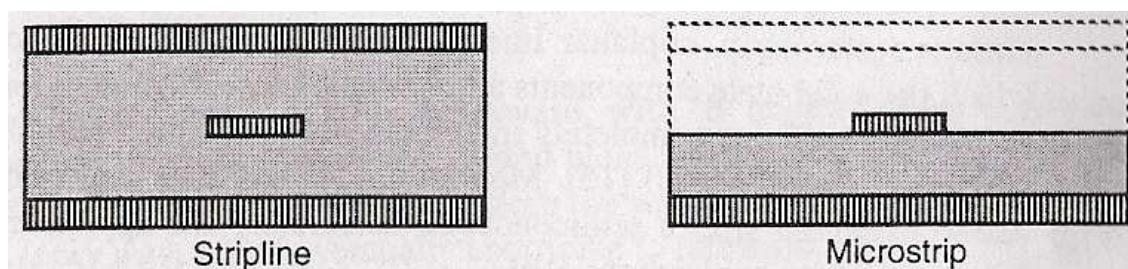


Figura 3.1 Corte transversal de stripline y de microstrip.

Posteriormente a las tecnologías de microstrip y stripline aparecieron las slotlines y las líneas coplanares, las slotlines tienen una estructura similar a las líneas de microstrip con la diferencia que poseen una ranura en la línea conductora. Las líneas coplanares tienen dos ranuras paralelas en la línea conductora. [Figura 3.2]

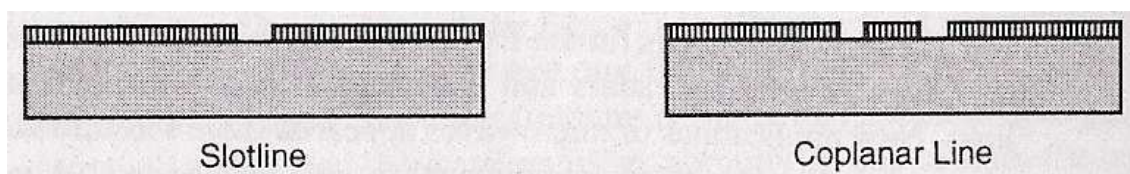


Figura 3.2 Corte transversal de slotline y de línea coplanar.

### 3.3 TIPOS DE ONDAS EN LAS LÍNEAS MICROSTRIP

Existe cuatro tipos de ondas en las líneas microstrip, las ondas espaciales son enviadas al espacio libre con ángulos de elevación de entre  $0$  y  $\pi/2$  y se atenúan conforme se distancian del origen. [Figura 3.3] Si hablamos de antenas representan las ondas radiadas mientras que si hablamos de líneas de transmisión significan pérdidas.

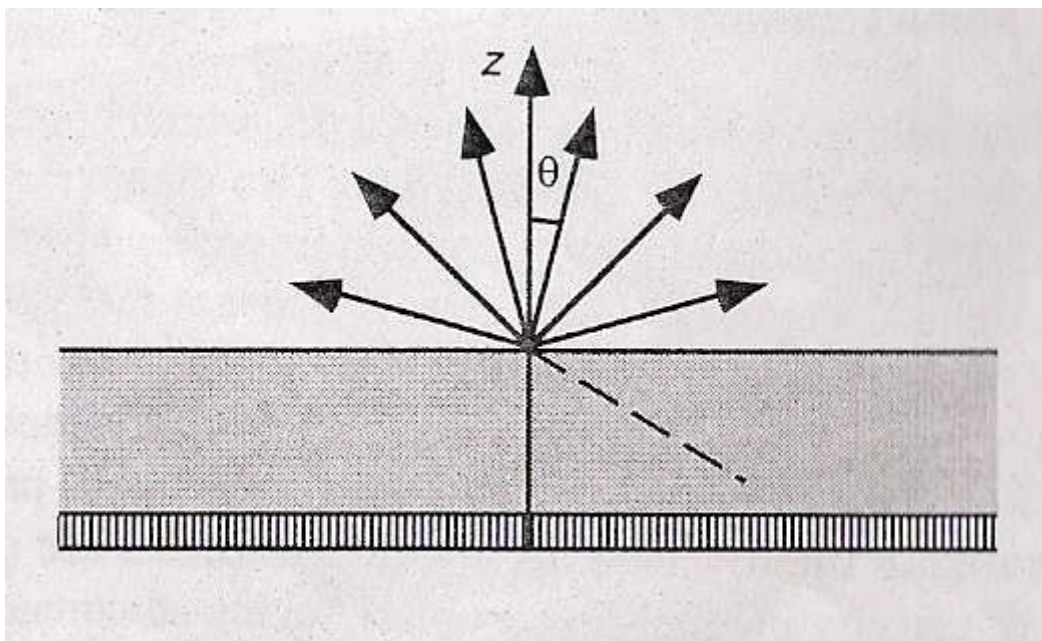


Figura 3.3 Ondas espaciales.

El segundo tipo son las ondas superficiales, toman dirección descendente y cuando se encuentran el plano de tierra se reflejan quedando confinadas dentro del dieléctrico.[Figura 3.4] Las ondas superficiales toman parte de la energía de la señal enviada incrementando las pérdidas y reduciendo la eficiencia. Si las ondas confinadas en el dieléctrico alcanzan las fronteras de la estructura microstrip, la onda es difractada por los extremos del microstrip. La onda difractada altera los patrones de radiación aumentando los lóbulos laterales y el nivel de polarización cruzada. Las ondas superficiales son perjudiciales tanto para circuitos y líneas de transmisión como para el funcionamiento de antenas por lo que siempre intentaremos minimizarlas.

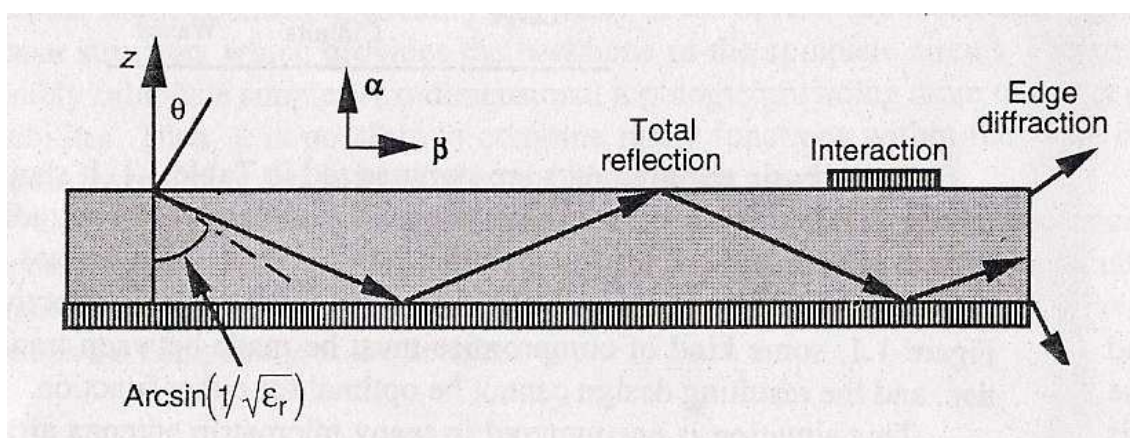


Figura 3.4 Ondas superficiales.



Por último tenemos las ondas de fuga y las ondas guiadas, las primeras son parecidas a las superficiales con la diferencia de que cuando alcanzan la entrecara del sustrato y el espacio libre una parte de las ondas de las ondas es reflejada nuevamente mientras que otra se fuga al espacio libre, este proceso se repite y como una parte sale al espacio libre la magnitud de las ondas en el sustrato va decreciendo con la distancia hasta desaparecer.[ Figura 3.5]

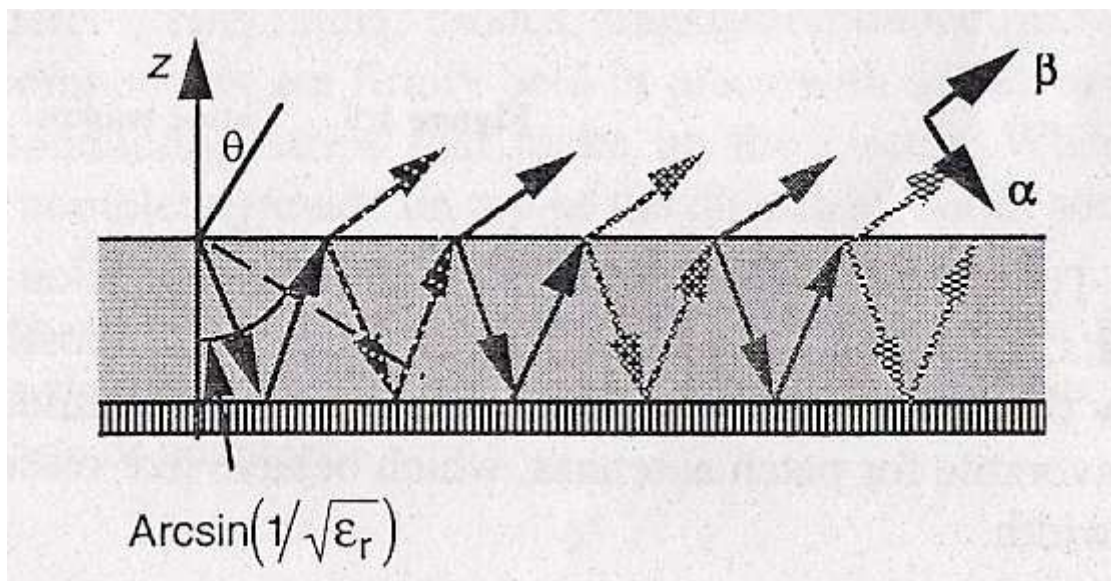


Figura 3.5 Ondas de fuga.

Las ondas guiadas se presentan en circuitos impresos utilizados para líneas de transmisión o guías de ondas y que encontramos cuando la parte superior del sustrato dieléctrico está metalizado, las ondas guiadas se encuentran entonces viajando en el sustrato rebotando tanto en la parte metálica superior como en la tierra, ésta circunstancia solo se da para ángulos de incidencia determinados. Las ondas guiadas representan el modo de funcionamiento de las líneas de transmisión y circuitos donde los campos electromagnéticos se concentran debajo de la capa conductora superior, sin embargo son perjudiciales para las antenas de parche que se comportan como resonadores con un ancho de banda limitado.[ Figura 3.6]

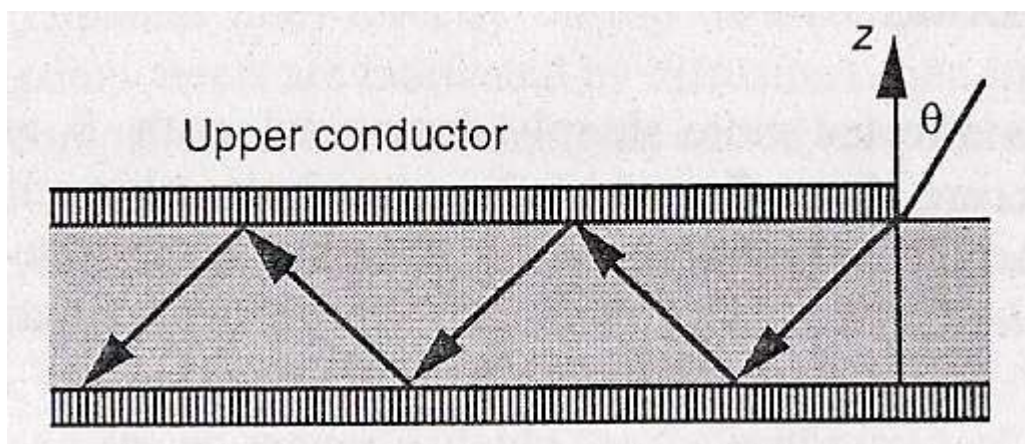


Figura 3.6 Ondas guiadas.

### 3.4 NECESIDADES PARA CIRCUITOS Y ANTENAS

Dependiendo de las aplicaciones requeridas para la línea microstrip necesitaremos un espesor de sustrato y permitividad dieléctrica del mismo diferentes con la finalidad de que predominen un tipo de ondas para lograr el comportamiento deseado de la línea microstrip. Las ondas superficiales se pueden emplear para lograr acoplamiento de circuitos pero en general son no deseadas.

En el caso de líneas de transmisión interesa que la mayor parte de la energía se encuentre entre los dos conductores por lo que se intentará que el espesor del sustrato sea pequeño en comparación con la longitud de onda y que la permitividad del sustrato sea alta. La mayor parte de las ondas que encontraremos en el circuito serán guiadas.

Para las antenas elegiremos un sustrato grueso en relación a la longitud de onda y con una permitividad baja para conseguir que predominen las ondas radiadas, justo lo contrario que para circuitos y líneas de transmisión. Para lograr un circuito que cumpliera ambas funciones se debería alcanzar un compromiso ya que no se puede alcanzar la máxima eficiencia en ambos casos a la vez.

Para minimizar las pérdidas deberemos utilizar sustratos de calidad.[Tabla 3.3] Si disminuimos el espesor del sustrato el ancho de banda es menor, la frecuencia de resonancia aumenta y la longitud resonante del parche disminuye. Para aumentar el ancho de banda deberemos aumentar el espesor del sustrato, aumentar la longitud resonante del parche, disminuir la frecuencia de resonancia y disminuir las dimensiones del plano de masa.[Tabla 3.1 y Tabla 3.2]

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Espesor del sustrato disminuye  | Ancho de banda disminuye<br>Frecuencia de resonancia aumenta<br>Longitud resonante del parche disminuye   |
| Para aumentar el ancho de banda | Aumentar el espesor del sustrato<br>Aumentar la longitud resonante del parche<br>Disminuye la frecuencia de resonancia<br>Disminuir las dimensiones del plano de masa |

Tabla 3.1 Resumen de los fundamentos del diseño de antenas parche.

| PROPÓSITO                                   | ESPESOR DEL SUSTRATO | CONSTANTE DIELECTRICA( $\epsilon_r$ ) |
|---|----------------------|---------------------------------------|
| Disminuir la radiación de las líneas        | Pequeño              | Alta                                  |
| Pequeñas dimensiones de antenas             | Pequeño              | Alta                                  |
| Bajas pérdidas (por onda de superficie,...) | Pequeño              | Baja                                  |
| Aumentar el ancho de banda                  | Grande               | Baja                                  |
| Mayor eficiencia de radiación               | Grande               | Baja                                  |
| Menor sensibilidad frente a tolerancias     | Grande               | Baja                                  |

Tabla 3.2 Espesor y permitividad del sustrato recomendados según el propósito.



## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

| SUSTRATO   | CONSTANTE DIELÉCTRICA( $\epsilon_r$ ) | PÉRDIDAS: $\tan(\delta)$ |
|--|---------------------------------------|--------------------------|
| Epoxy fibra de vidrio FR-4                         | 4.4                                   | 0.01                     |
| Rohacell Foam                                      | 1.07                                  | 0.001                    |
| Honeycomb  | 1.02                                  | <0.0001                  |
| Kapton   | 3.5                                   | 0.002                    |
| RT Duroid5880<br>(teflón + glass fiber)            | 2.2                                   | 0.0009                   |
| Oxidos de Titanato de Bario<br>Ceramic dielectrics | >80                                   | 0.0001                   |

Tabla 3.3 Características técnicas de los principales sustratos empleados.

En conclusión nos interesará tomar una solución de compromiso en varios aspectos, por ejemplo un espesor de sustrato delgado nos permitirá disminuir las pérdidas por ondas de superficie mientras que conforme aumentemos ese espesor podremos tener un ancho de banda más ancho. Una constante dieléctrica del sustrato ( $\epsilon_r$ ) elevada nos permitirá contruir una antena de pequeñas dimensiones, una anchura de línea mucho más pequeña que la mitad de la longitud de onda de la señal en el espacio libre nos permitirá reducir las dimensiones de la antena y minimizar la radiación de las líneas.

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS MICROSTRIP

Las antenas planas utilizan parches diseñados en tecnología microstrip, estos parches son una lámina metálica de tamaño resonante ( $0.25 \lambda_0$ - $1 \lambda_0$ ), típicamente será la mitad de la longitud de onda de la señal en el espacio libre ( $0.5 \lambda_0$ ) que dará como resultado un parche resonante en el modo fundamental. El espesor de ésta lámina será muy delgado, comprendido entre  $18 \mu\text{m}$  y  $35 \mu\text{m}$ . El parche resuena en una de sus direcciones, a lo largo y radia en la otra, a lo ancho. El parche se sustenta sobre una lámina formada por un sustrato dieléctrico de un espesor típico entre  $0.005 \lambda_0$  y  $0.2 \lambda_0$ . Y una constante dieléctrica comprendida entre 1 y 12. [Figura 3.9]

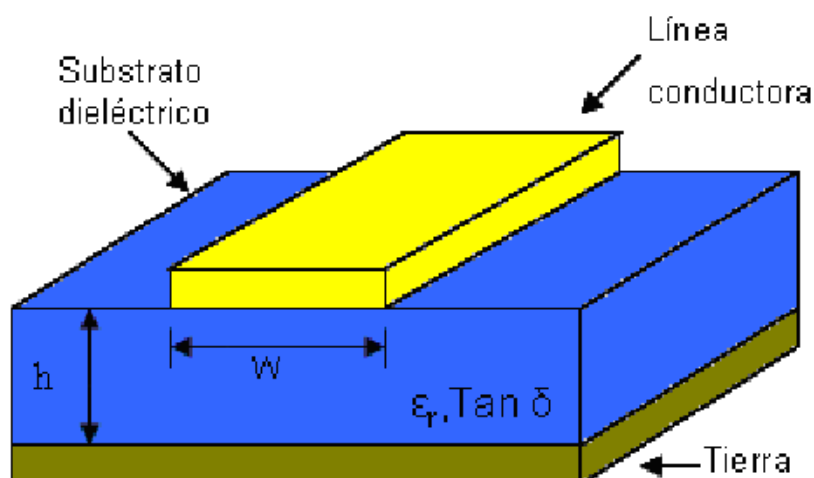


Figura 3.9 Estructura microstrip.

♦ **Parche:**

- Lámina metálica de tamaño resonante ( $0.25\lambda_0 - 1\lambda_0$ )  
Longitud del parche  $= 0.5\lambda_0$  resonante en el modo fundamental  
Muy delgada, típicamente entre  $18\mu\text{m}$  y  $35\mu\text{m}$ .

♦ **Sustrato:**

- Lámina dieléctrica que sustenta el parche  
Espesor:  $0.005\lambda_0$  y  $0.2\lambda_0$
- Constante dieléctrica:  $1 \leq \epsilon_r \leq 12$ .

♦ **Plano de masa**

♦ **Excitación:** suministra la energía RF a los parches

Partiendo de esta formación podemos encontrar desde las antenas de parche más sencillas hasta estructuras complejas combinando diferentes sustratos y parches en paralelo. [Figura 5.12] El parche se diseña de tal forma que la radiación máxima sea normal a la superficie del mismo, lo cual depende del modo de excitación empleado. Las configuraciones más habituales de parches son los parches cuadrados, rectangulares, dipolo y circular, pero hay otros tipos como el elíptico, el triangular y el anillo. [Figuras 3.10 y 3.11]

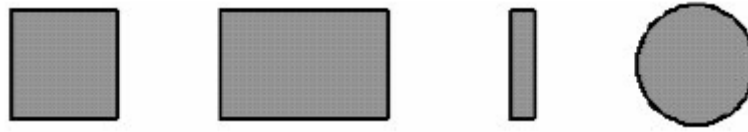


Figura 3.10 Parches más habituales.

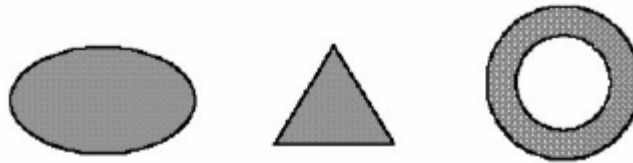


Figura 3.11 Otros parches.

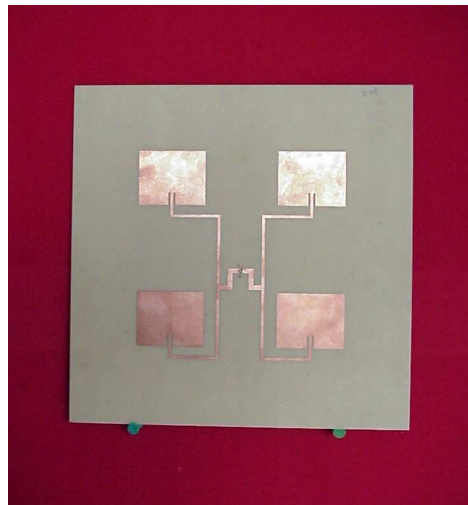


Figura 3.12 Array de 4 parches.

## 3.6 MÉTODOS DE ALIMENTACION

- Línea microstrip: se trata de una línea conductora de anchura generalmente mucho menor que la del parche. Como ventajas podemos destacar su facilidad para fabricarla y modelarla. Por el contrario al aumentar el espesor del sustrato se incrementan las ondas de superficie y las radiaciones espurias acotando el ancho de banda entre un 2 % y un 5 %. El acoplo entre el parche y la línea produce niveles altos de radiación en polarización cruzada y campos inducidos. La falta de simetría de la antenna hace que se generen modos de orden mayor y que aumente el nivel de radiación en polarización cruzada. [Figura 3.13]

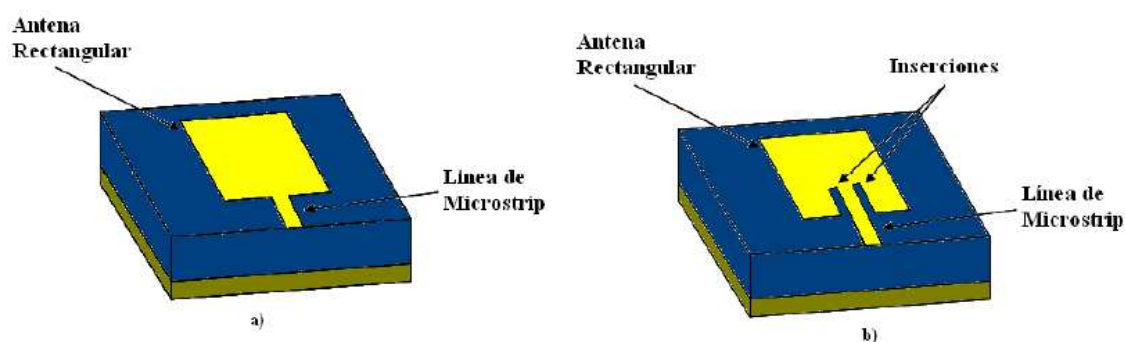


Figura 3.13 Alimentación mediante línea microstrip: a) Conexión directa de la línea de microstrip a la antena y b) conexión de línea de microstrip mediante inserciones.

- Sonda coaxial: el conductor interior está unido al parche radiante y el conductor exterior está conectado al plano de masa. Es fácil de construir y tiene bajo nivel de radiaciones espurias. Como desventajas tenemos un ancho de banda reducido y que son difíciles de modelar, sobre todo con sustratos gruesos ( $\text{espesor} > 0.2 \lambda_0$ ), porque la propia vía puede actuar como una antena perturbando la señal generada por el parche. También nos encontramos el mayor nivel de radiación en polarización cruzada producida por los modos de orden mayor, causa de la asimetría de la antena. [Figura 3.14]

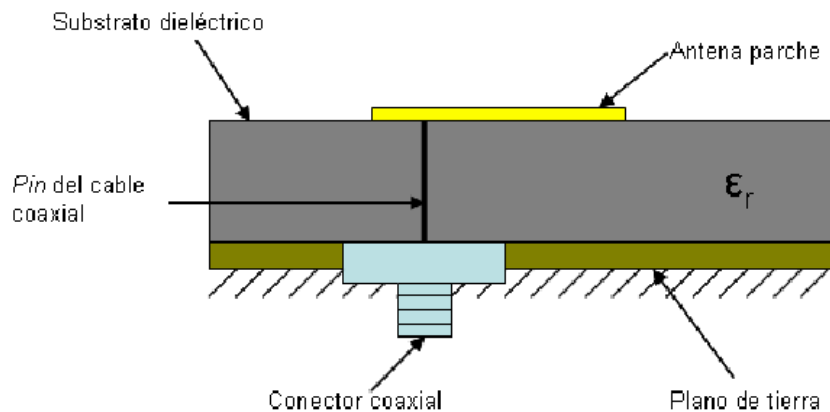


Figura 3.14 Alimentación mediante sonda coaxial.

- Acoplo por ranura radiante: éste método soluciona los efectos de radiación en polarización cruzada y la aparición de modos de órdenes superiores. Es el más difícil de fabricar y el que menos ancho de banda proporciona pero es más fácil de modelar y tiene un menor nivel de radiaciones espurias. Se basa en dos sustratos separados por un plano de masa. En la superficie inferior del sustrato situado debajo encontramos la línea impresa, su energía se acopla al parche a través de una ranura que tiene el plano de masa que separa ambos dieléctricos. Esta configuración nos permite mejorar el mecanismo de alimentación y el elemento radiante independientemente variando la anchura de la línea de alimentación o la longitud de la ranura. El plano de masa aísla la alimentación del elemento radiante y minimiza la interferencia de las radiaciones espurias. [Figura 3.15]

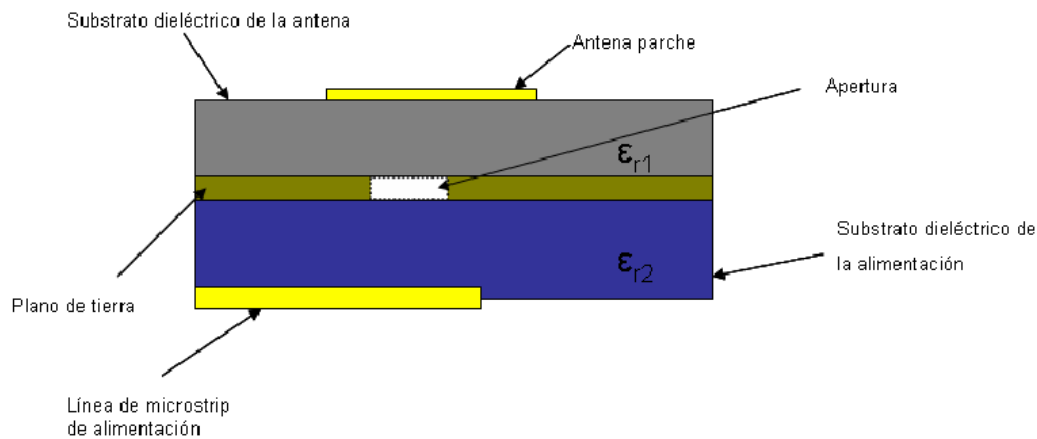


Figura 3.15 Alimentación mediante ranura radiante.

Acoplo por proximidad: éste método evita las desventajas de los dos primeros métodos. Se basa en el acoplo de energía desde la línea de transmisión utilizada como alimentación del elemento radiante. Este acoplo se produce a través del sustrato superior, que suele ser delgado. Obtenemos una buena pureza de polarización, ausencia de radiación en polarización cruzada en los planos principales, baja radiación espuria y un mayor ancho de banda (hasta un 13 %) que en los modelos anteriores. [Figura 3.16]

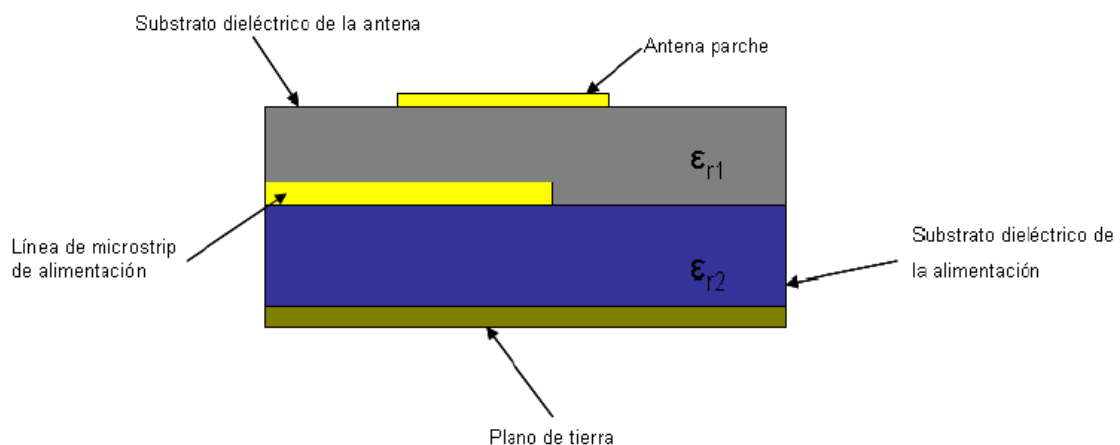


Figura 3.16 Alimentación mediante línea microstrip.

## 3.7 REFERENCIAS

[ 3.2 3.3 y 3.6 ] **Jean Francois Zürcher and Fred E. Gardiol**, Broadband Patch Antennas, **Artech House**

## 4 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Las antenas de parche pueden ser estudiadas mediante varios métodos analíticos que se diferencian en su complejidad y precisión. Los modelos más usados son los de línea de transmisión y el de cavidad resonante. El primero es poco preciso a pesar de ser muy simple e intuitivo. El de cavidad resonante es más preciso pero de mayor complejidad.

### 4.1 MODELO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Es el modelo más sencillo, refiriéndonos a una antena simple de parche rectangular la simulamos como si fueran dos elementos radiantes separados a una distancia similar a la longitud del parche. Éste método nos proporciona buenos resultados para sustratos delgados, esto es para  $h \ll \lambda_0$ . [ Figura 4.1]

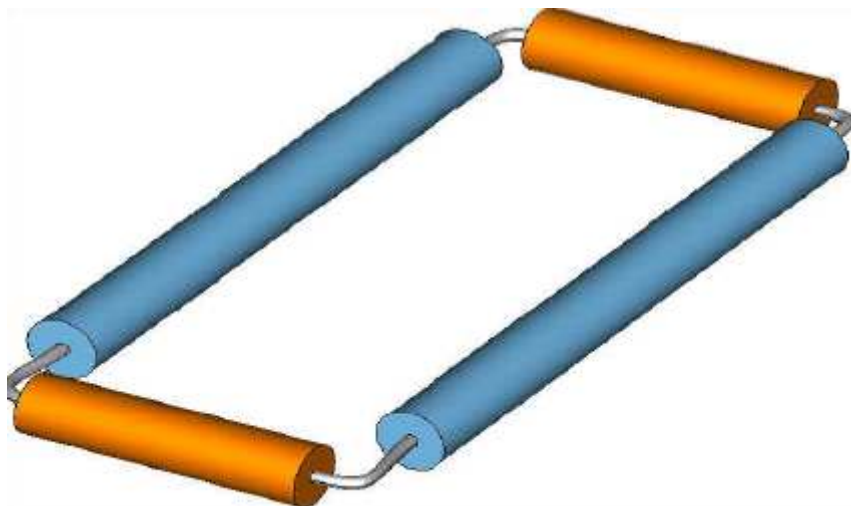


Figura 4.1. Modelo de línea de transmisión equivalente.

Los resultados que nos da son precisos para obtener el diagrama de radiación pero insuficientes para el análisis de la impedancia de entrada. Las dimensiones finitas del parche causan la difracción del campo electromagnético en los bordes del mismo por el llamado ‘efecto de bordes’. [ Figura 4.2]



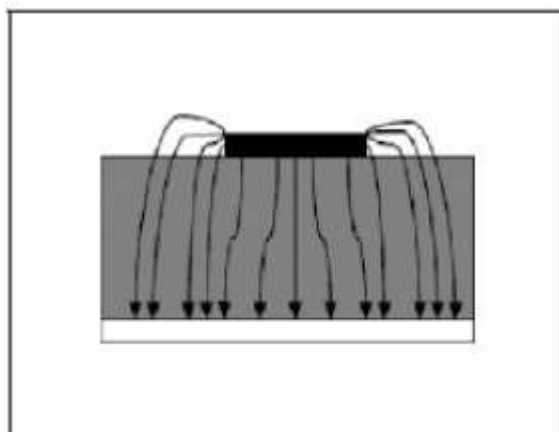


Figura 4.2 Líneas de campo electromagnético.

Una antena microstrip está inmersa en un medio no homogéneo, formado por dos dieléctricos, sustrato y aire. Si observamos la figura anterior podemos apreciar cómo algunas líneas de fuerza están presentes en el sustrato y otras en el aire, medios con diferente constante de propagación. Es muy útil para el análisis de este tipo de antenas el definir una constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{\text{ref}}$  como la permitividad que debe tener un medio dieléctrico homogéneo para que ocupando toda la estructura, proporcione la misma capacidad por unidad de longitud que la estructura no homogénea. Ésta constante dieléctrica efectiva será menor que la constante del sustrato y mayor que la constante del aire.

### 4.2 MODELO DE CAVIDAD RESONANTE

Al ser las antenas parche esencialmente de banda estrecha las podemos considerar como cavidades resonantes disipativas, rodeadas en su región interna por conductores magnéticos perfectos (un medio ideal con permeabilidad magnética,  $\mu$  infinita que hace nulo el campo magnético tangencial) y en su parte superior por conductores eléctricos perfectos (medio ideal con conductividad infinita que hace nulo el campo eléctrico tangencial).

La manera de radiar de una antena de parche viene determinada por la distribución de los campos entre la metalización y el plano de masa. Consideramos una antena de parche alimentada con una fuente genérica de microondas, esa energía genera una distribución de carga sobre la superficie superior e inferior del parche y sobre el plano de masa.

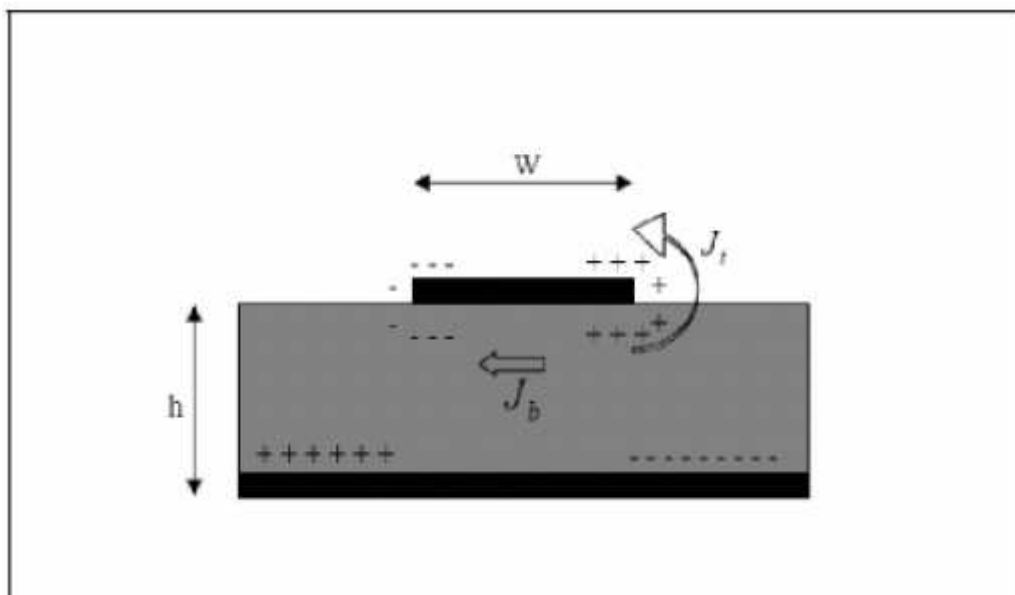


Figura. 4.3. Fenómeno de radiación en una antena microstrip.

La presencia de cargas positivas y negativas se debe al hecho de que la longitud del parche es igual a media longitud de onda en el modo dominante. La fuerza repulsiva entre estas cargas provoca que algunas de ellas se coloquen a lo largo de los bordes de las superficies superior e inferior del parche generando la densidad de corriente  $J_t$  y  $J_b$ . Ya que para la mayoría de las antenas parche la relación  $h/W$  es muy pequeña las fuerzas de atracción predominan entre las cargas permaneciendo así la mayoría del flujo de corriente confinado en el parche. Sin embargo, parte de la corriente fluye en torno a los bordes hasta que llega a la parte superior metalizada generando un campo magnético débil paralelo a los bordes. Asumiendo ese campo magnético nulo podemos considerar las paredes laterales de la antena como conductores magnéticos perfectos siempre que se cumpla que  $h \ll \lambda_0$ . [ Figura. 4.3]

Dado que las paredes de la cavidad y el material contenido en ellas no presentan pérdidas, la cavidad no puede radiar, siendo así su impedancia de entrada puramente reactiva. Para poder analizar las propiedades radiantes de la antena tenemos que introducir un mecanismo de pérdidas, haciendo uso de una resistencia de radiación y otra de pérdidas. Ahora tenemos una cavidad con pérdidas que puede representar una antena.

### 4.3 SOLUCIÓN DE ONDA COMPLETA “FULL WAVE”: MÉTODO DE LA INTEGRACIÓN FINITA EN EL DOMINIO DE TIEMPO

El método de la integración finita en el dominio del tiempo se utiliza para:

- Análisis y diseño de antenas

- Estudio de propagación de señales en dispositivos semiconductores.

- Diseño de circuitos de microondas y ópticos.

- Análisis de problemas de scattering y de absorción.

El método se basa en la discretización de las ecuaciones de Maxwell que relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que los crean, directamente en el dominio del tiempo, a través de oportunas diferencias finitas. El dominio computacional viene dividido en una malla. Por cada celda de la que está compuesta la malla, las tres componentes del campo eléctrico están posicionadas en las aristas que se alinean con la posición de los ejes cartesianos, mientras que las tres componentes del campo magnético vienen posicionadas en el centro de las tres caras correspondientes, respectivamente, a los planos  $xy$ ,  $yz$  y  $xz$ . El resultado es una distribución uniforme de las tres componentes de ambos campos, intercaladas de forma que reproducen los campos sobre todo el retículo. [ Figura 4.4]

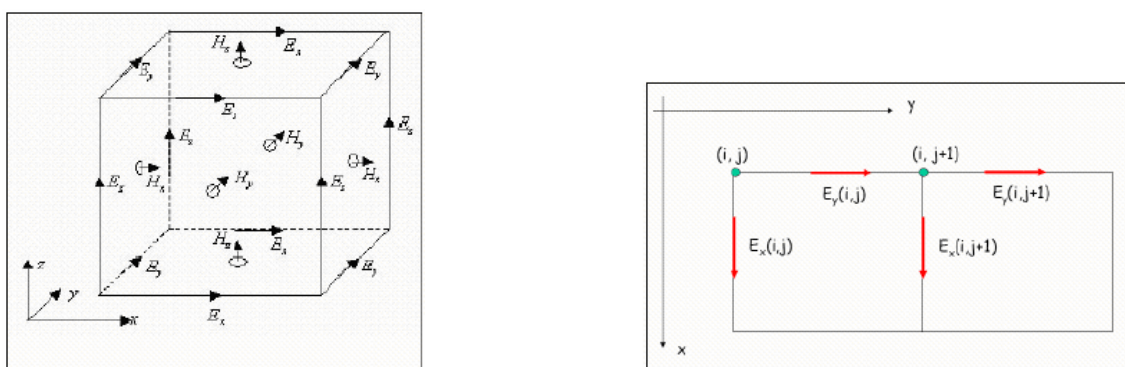


Figura 4.4 Malla unitaria del dominio discretizado o celda de Yee.

Los inconvenientes del método en cuestión están unidos a los problemas de estabilidad y errores provenientes de la imposición de determinadas condiciones de contorno, empleadas para finalizar el dominio computacional. Cuando se habla de estabilidad se refiere al hecho de que la solución no debe crecer en el tiempo, es decir, si el error en el paso  $n$  es  $\varepsilon_n$  entonces:

$$|\varepsilon_n| \geq |\varepsilon_{n+1}| \quad (6)$$

Al contrario que la estabilidad, la precisión indica cuan exacta es la solución, esto es, cuanto se acerca la solución encontrada a aquella real.

Las condiciones de contorno deben simular la lejanía de las ondas incidentes en la frontera del dominio de estudio (condiciones absorbentes). Las más conocidas son las ‘Absorbing Boundary Conditions’ (ABC) y las ‘Radiation Boundary Conditions’ (RBC), aunque ambas introducen errores que provocan reflexiones numéricas indeseadas.

## 4.4 CST MICROWAVE

### 4.4.1 INTRODUCCIÓN

El programa de simulación CST MICROWAVE STUDIO de la empresa CST (*Computer Simulation Technology*), es una herramienta especializada para la simulación electromagnética en tres dimensiones de componentes de alta frecuencia, implementa métodos de análisis de tipo onda completa, concretamente el Método de la Integración Finita en el Dominio del Tiempo (FITD). El CST MICROWAVE STUDIO ofrece rápidamente un vistazo del comportamiento electromagnético de los diseños de alta frecuencia y brinda una gran flexibilidad a los usuarios mediante un rango de aplicación muy amplio, gracias a la variedad de tecnologías disponibles.

Dicho programa posibilita un análisis rápido y preciso de antenas, estructuras resonantes, conectores, filtros y muchos otros dispositivos. Éste simulador utiliza algoritmos que resuelven las problemáticas habituales en éste tipo de simulaciones como ‘Perfect Boundary Aproximation’(PBA), ‘Finite Integration Technique’(FIT) y el ‘Thin Sheet Technique’(TST) consiguiendo resultados muy precisos.

Dispone de 5 módulos de cálculo: ‘Transient Solver’, ‘Eigenmode Solver’, ‘Frequency Domain Solver’, ‘Resonant: Fast S-Parameter solver’ y ‘Resonant S-Parameter Fields solver’.

El módulo ‘Transient Solver’ ha sido el utilizado en las simulaciones efectuadas. Es la herramienta más flexible del programa y permite simular la mayoría de problemas electromagnéticos.

Dispone de una interfaz gráfico muy potente que permite generar todo tipo de superficies y volúmenes, pudiéndose combinar de forma booleana para generar nuevas formas según convenga. [Figuras 4.5, 4.6 y 4.7]

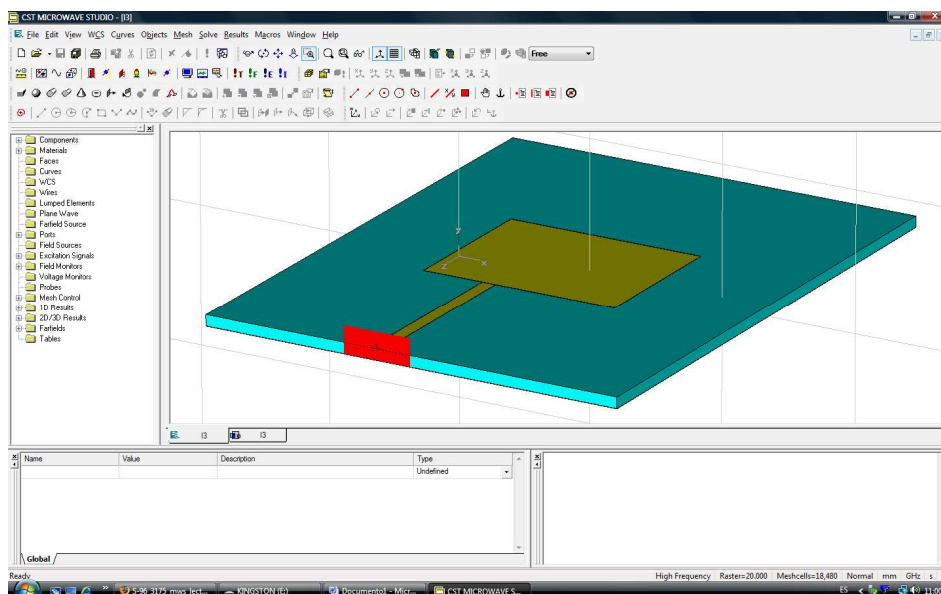


Figura 4.5 Diseño de un antena de parche.

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

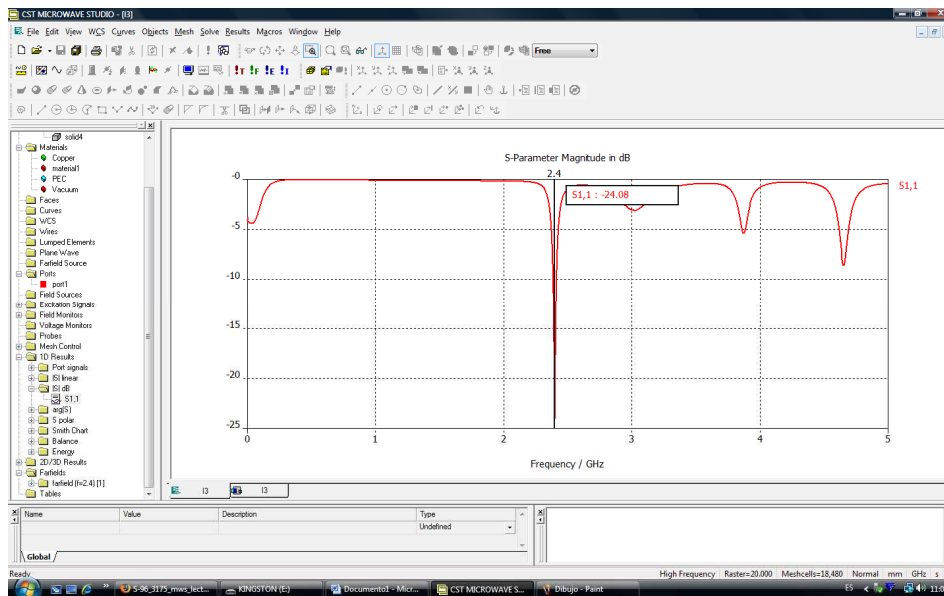


Figura 4.6 Simulación de la adaptación.

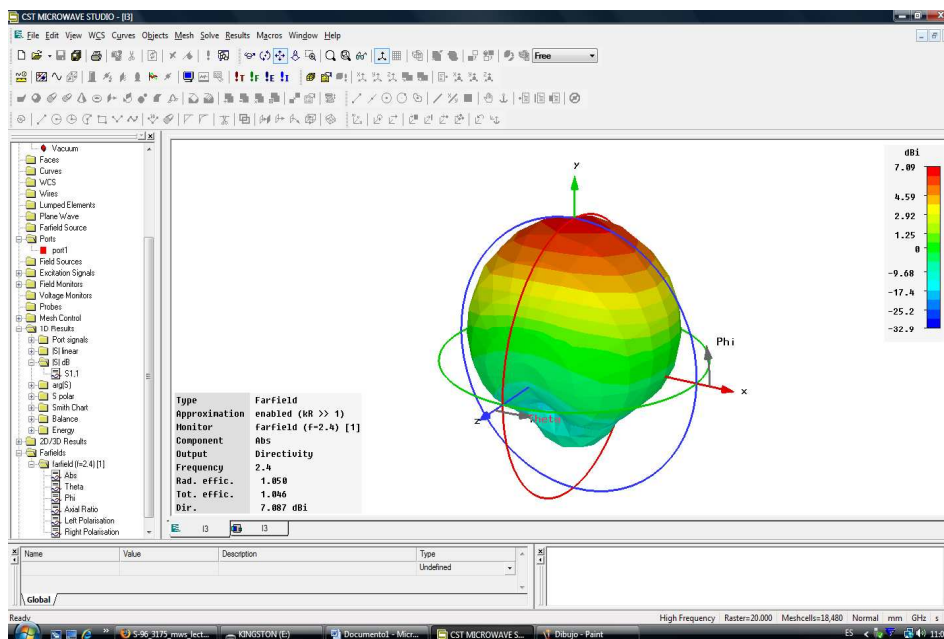


Figura 4.7 Simulación de la radiación.

### 4.4.2 MANEJO.

El CST permite trabajar con presets y diseñar tus propios modelos. Para diseñar una antena de parche rectangular se utiliza la herramienta de crear paralelepípedos, definiendo las coordenadas de los prismas se construirá una antena de parche rectangular alimentada por una línea microstrip, también se puede elegir los materiales de una librería o definir nuevos materiales y sus propiedades. [Figura 4.8]

Una vez tenemos dibujada la estructura tenemos un fichero .cst y al simular esa estructura el programa nos genera una carpeta con los resultados de las simulaciones.

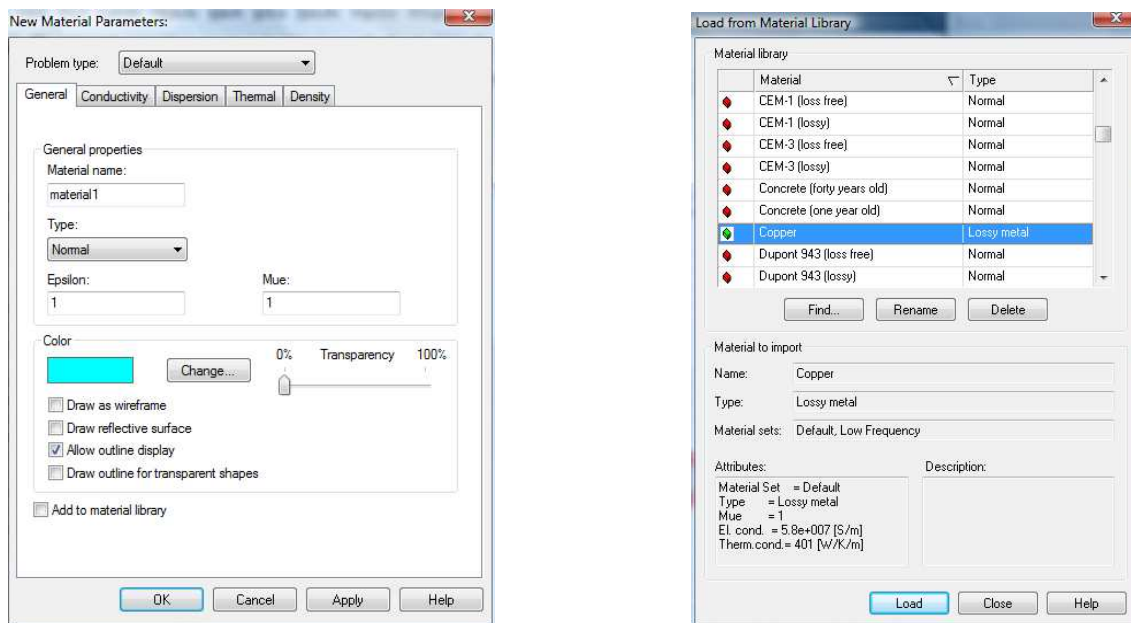


Figura 4.8 Ventanas de librería de materiales y definición de nuevo material.

Una vez se tiene la estructura diseñada se definen las unidades en las que vamos a trabajar, milímetros para las dimensiones y GHz para la frecuencia así como las propiedades del espacio indefinido dentro de los límites pudiendo elegir entre un conductor eléctrico perfecto (PEC) y un material normal libre de pérdidas. También se definen el rango de frecuencias en el que se quiere trabajar y las condiciones de los límites ya que el ordenador solo es capaz de calcular problemas con una extensión finita. Hay 6 tipos de condiciones de contorno: periódicas, celda unidad, conductor eléctrico perfecto, conductor magnético perfecto, abierto opera como el espacio libre donde las ondas pueden pasar este límite con reflexiones mínimas y abierto con espacio añadido que opera igual que el abierto pero dejando espacio extra para cálculos de campo lejano. Se elige el contorno abierto con espacio añadido. [Figura 4.9]

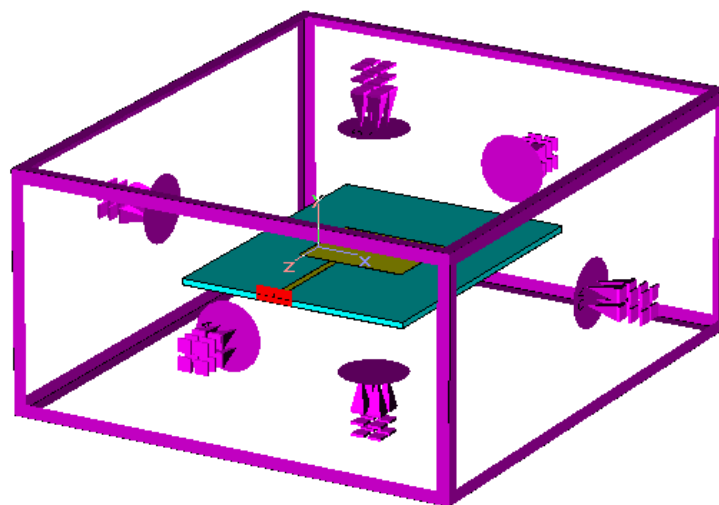


Figura 4.9 Condiciones de los límites, 'Open add space'.

Se debe colocar en el diseño un Puerto por donde alimentar la antena, para ello se selecciona la cara del paralelepípedo y se coloca el puerto eligiendo sus dimensiones. Una vez se tiene todo listo se activa el 'transient solver' y el programa abre una ventana para fijar el puerto por el que se va a estimular la antena, la impedancia y elegir entre un mallado automático o adaptado a la forma de la antena. También se puede elegir el número de ciclos de la simulación, se deben elegir suficientes ciclos para que la energía de la señal de excitación baje a - 80 decibelios.

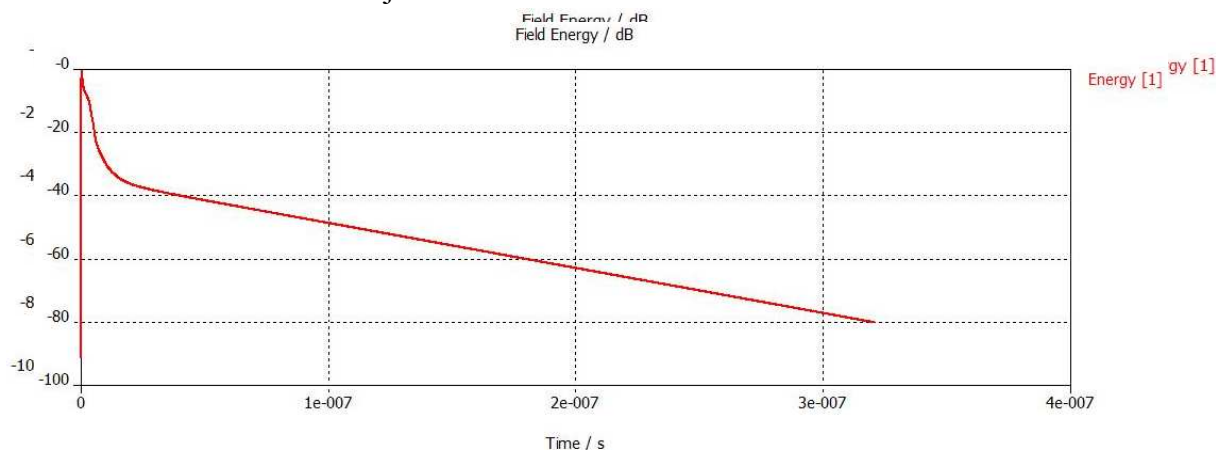


Figura 4.10 Gráfico de la evolución de la señal de excitación en la estructura en el tiempo

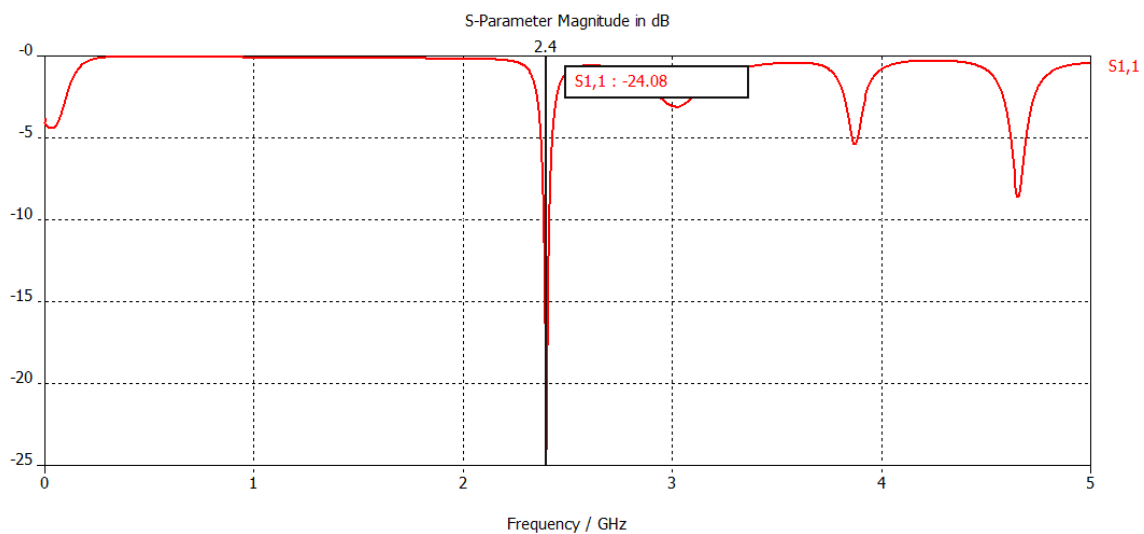


Figura 4.11 Gráfico de la adaptación del diseño.

Una vez conocemos la frecuencia de resonancia del parche, para conocer la directividad, definimos un monitor de campo lejano a esa frecuencia. A continuación volvemos a simular el diseño y obtenemos el diagrama de radiación.

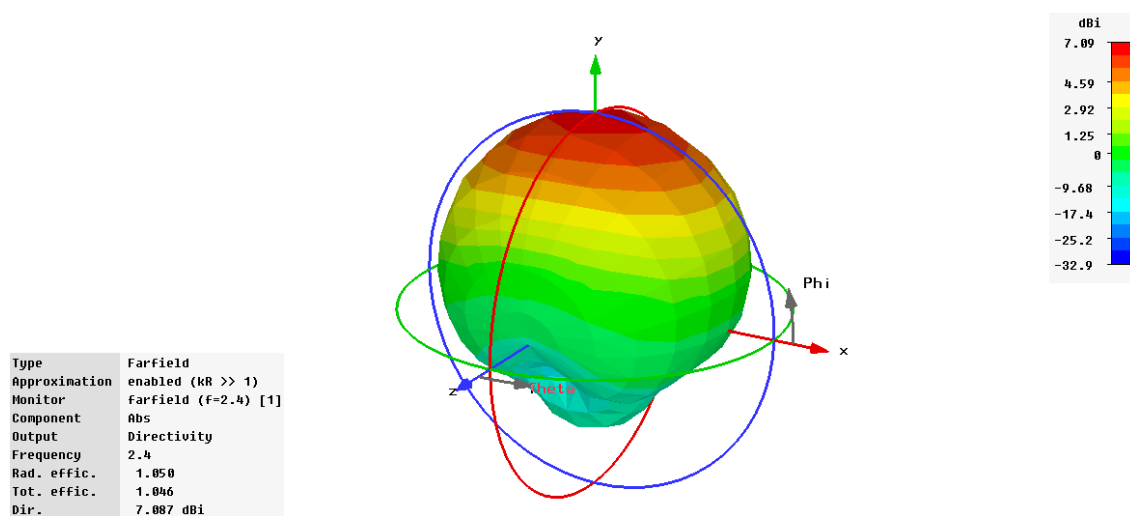


Figura 4.12 Diagrama de radiación



### 4.4.3 NECESIDAD DEL CST MICROWAVE

La necesidad del empleo del CST MICROWAVE STUDIO viene dada por la complejidad de los otros tipos de análisis y por el tiempo que requieren esos cálculos. El diseño de esta antena se ha llevado a cabo de una forma empírica por lo que la rapidez de los cálculos de la herramienta ‘transient solver’ del CST MICROWAVE me ha permitido ir conociendo sobre la marcha los efectos de las modificaciones que realizaba sobre el modelo original.

Además los métodos de análisis teóricos tienen una serie de limitaciones que el CST MICROWAVE STUDIO solventa fácilmente como por ejemplo que los modelos teóricos asumen unas medidas infinitas del sustrato cuando este en realidad tiene unas dimensiones determinadas.

Dados mis conocimientos limitados de antenas y electromagnetismo se necesitaba un programa que permitiera realizar ensayos con las dimensiones y los materiales del parche y el sustrato para aproximarme empíricamente y ayudado por los consejos de mi tutor a los resultados de adaptación, eficiencia, directividad y ganancia deseados. Este programa me ha permitido ver de una forma bastante inmediata como afectaban los cambios en las dimensiones de la estructura y los materiales a los parámetros antes citados y poder afinar poco a poco a los resultados deseados.

## 5 DESCRIPCION EQUIPO DE MEDIDA.

### 5.1 ANALIZADOR DE REDES

El único aparato de medida utilizado ha sido el analizador de redes, es un instrumento capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión (Parámetros-S). Los analizadores de redes son más frecuentemente usados en altas frecuencias, que operan entre los rangos de 9 kHz hasta 110 GHz.

Hay varios tipos de analizadores de redes, entre ellos citaremos:

SNA (Scalar Network Analyzer) – Analizador de redes escalar, mide propiedades de amplitud solamente

VNA (Vector Network Analyzer) – Analizador de redes vectoriales, mide propiedades de amplitud y fase.

Un analizador del tipo VNA también puede ser llamado medidor de ganancia y fase o analizador de redes automático. Un analizador del tipo SNA es funcionalmente idéntico a un analizador de espectro combinado con un generador de barrido

El analizador de redes ha sido el Agilent 8722ES es un instrumento de dos puertos que mide la transmisión y reflexión complejas en el dominio de la frecuencia. [Figura 5.1]

- Medidas desde 50MHz hasta 40GHz con 1Hz de resolución
- 100dB de rango dinámico
- Potencia de salida desde -75 dBm hasta -10 dBm

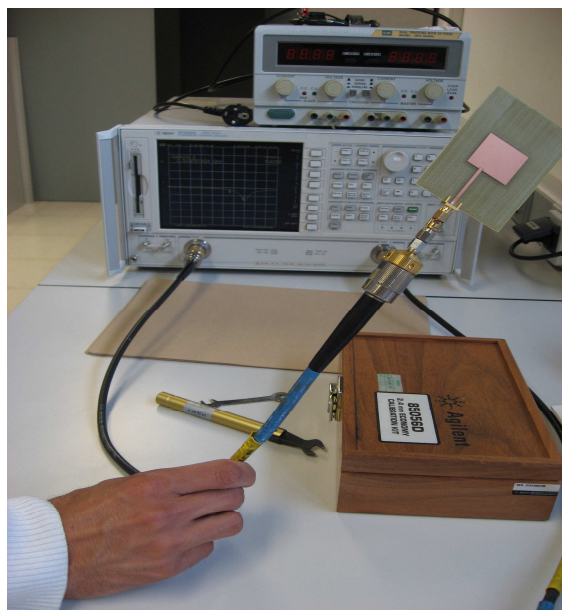


Figura 5.1. Detalle de la medida de adaptación de la antena.

### 5.2 CALIBRACIÓN

La calibración de un aparato en general se realiza debido a que la respuesta de los equipos no es estable en el tiempo debido a varios factores como envejecimiento, deterioro, temperatura, etc.

El objetivo último de una calibración es asegurar que si dos laboratorios tienen equipos que se calibran de una manera trazable a un patrón de referencia las dos medidas serán comparables.

Por ello es necesario realizar una operación de comparación de las respuestas de los equipos o sistemas de medida con los valores conocidos de una medida para garantizar: i) que medimos igual que otros laboratorios y ii) que los valores de nuestras medidas se mantienen con el paso del tiempo.

La calibración de un analizador de redes es un proceso de alta precisión en el cual, se deben tener en cuenta tanto la impedancia en la que se está operando como las condiciones en las que está operando el equipo. Por este motivo, y dependiendo de la cantidad de Parámetros-S que se requiera medir el proceso puede resultar largo y tedioso por la cantidad de veces que se tuviera que repetir.

El estándar de calibración usa tres dispositivos de prueba llamados OPEN (red abierta), SHORT (red en corto circuito), y THRU (red conectada), los cuales deben ser conectados a los puertos del analizador para que este pueda comparar y establecer la diferencia entre estos tres modos, estos datos son guardados en un registro y cada registro debe ser calibrado independientemente y en el momento en que se le haga una modificación a la red en estudio.

## 6 PROCESO Y RESULTADOS

### 6.1 INTRODUCCIÓN

Para diseñar la antena de parche se comenzó leyendo algunos apuntes de líneas de transmisión así como algunos tutoriales de CST en Internet para ver un poco las posibilidades del programa, pero hasta que no se comenzó a trabajar con el programa y a simular antenas no ha sido posible percatarse de las posibilidades del CST ni de los errores habituales. Las medidas analizadas de las simulaciones han sido las de adaptación que nos da la idea de la transferencia de potencia entre la antena y la carga y la de eficiencia de radiación que representa la energía radiada en relación a la energía que se le suministra a la antena.

### 6.2 STRIPLINE

Se comenzó diseñando mediante el CST una línea microstrip sin ningún parche.

Tras consultar una serie de libros para averiguar el grosor y la constante dieléctrica típica del sustrato más utilizado, FR4, se empezó a realizar pruebas de simulaciones con el software. [ Figura 6.1 y 6.2]

Los primeros diseños realizados era imposible simularlos por una serie de factores, el programa es sencillo de utilizar pero para poder simular los diseños es necesario definir una serie de parámetros y características del entorno en el CST, hace falta fijar las unidades en que vamos a trabajar, definir el espacio en que se encuentra la antena, es decir, asignar un material al espacio indefinido dentro de los límites (background properties) pudiendo elegir entre un conductor eléctrico perfecto (PEC) y un material normal libre de pérdidas definido por su constante dieléctrica y permeabilidad, y fijar el rango de frecuencias del proyecto.

Es necesario asimismo colocar un puerto por donde alimentar el microstrip o el parche. Una vez solucionados estos problemas, quedaba por solucionar otro inconveniente que era un aviso que daba el CST, 'Maximum number of pulse widths simulated, solver stopped. Please note that the steady state energy criterion has not been satisfied', en todas las simulaciones el cual se remedió aumentando el número de ciclos a 500 ciclos a fin de que la energía de la excitación aplicada a la antena baje de 0 a -80 decibelios en un tiempo determinado. [ Figura 6.3 y Figura 6.4]

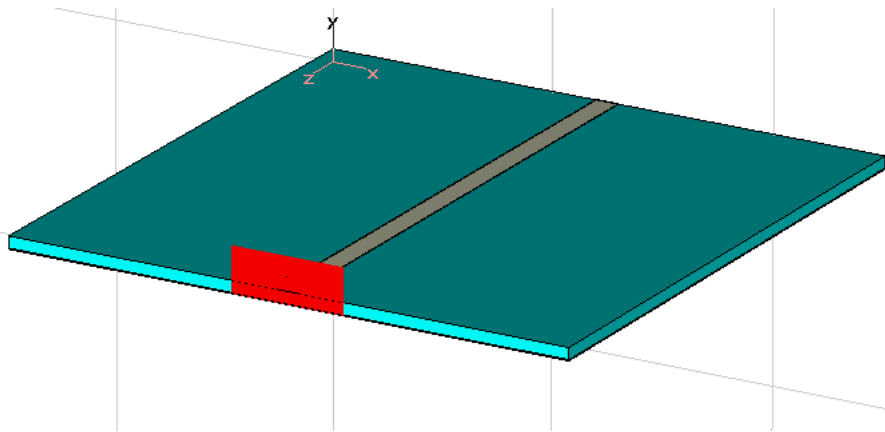


Figura 6.1 Stripline

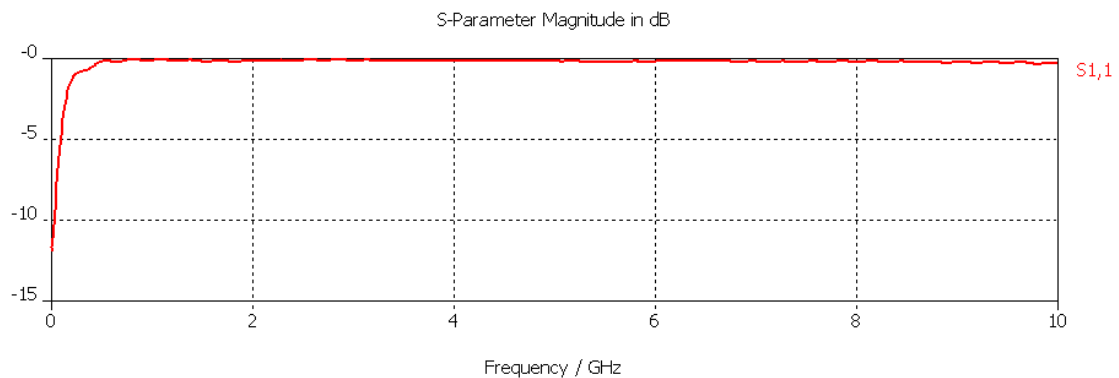


Figura 6.2 Adaptación stripline.


 Maximum number of pulse widths simulated, solver stopped.  
Please note that the steady state energy criterion has not been satisfied.

Figura 6.3 Aviso de parada en la simulación del stripline.

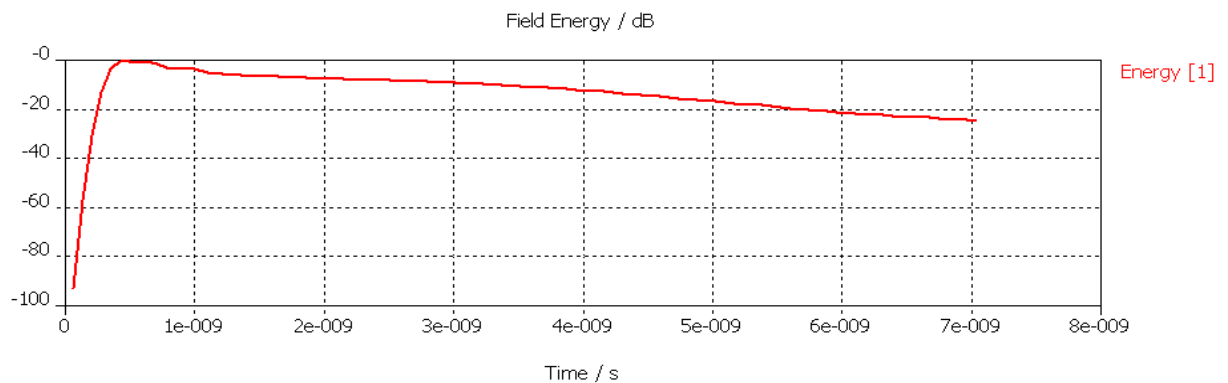


Figura 6.4 Energía en la simulación del stripline.

### 6.3 PARCHE

Tras las primeras simulaciones del microstrip se comienza con las simulaciones de la antena de parche, utilizando el mismo tamaño de dieléctrico que para el microstrip pero añadiendo un parche en el centro del mismo sin conseguir los resultados esperados. El objetivo es tener un pico de resonancia a 2.5 GHz obteniendo en los resultados de la simulación un pico a 9 GHz. Se llevan a cabo varias pruebas aumentando el tamaño del dieléctrico y el parche, primero de pocos en pocos milímetros y luego doblando su superficie, desplazando el parche dentro del sustrato a izquierda y derecha sin conseguir cambios significativos. Por fin se realiza el diseño utilizando las medidas recomendadas de una longitud de parche de entre  $0.25 \lambda_0$  y  $\lambda_0$  y un grosor de entre 18  $\mu\text{m}$  y 35  $\mu\text{m}$ . Se pretende que la gráfica de adaptación tenga un mínimo en 2.45 GHz lo que equivale a una longitud de onda de 127.6 mm luego podría utilizar un parche desde 31 milímetros hasta 127 milímetros. Con estas medidas la simulación da un pico exactamente en 2.45 GHz que es mi intención inicial.

Este diseño tiene un problema y es que no se ha utilizado el grosor de sustrato de 1.588 milímetros que se consultó con lo que los resultados obtenidos están bien pero a la hora de construir la antena se utilizará otro grosor de sustrato diferente y los resultados no se podrán comparar. Se realiza otro diseño utilizando el FR4 de 1.588 milímetros de grosor obteniendo unas medidas de adaptación similares con el pico a unos 3 GHz, tras realizar unos ajustes en las dimensiones del modelo, agrandar el sustrato al doble y centrar el parche se obtiene una simulación satisfactoria. [Figura 6.5 y Figura 6.6]

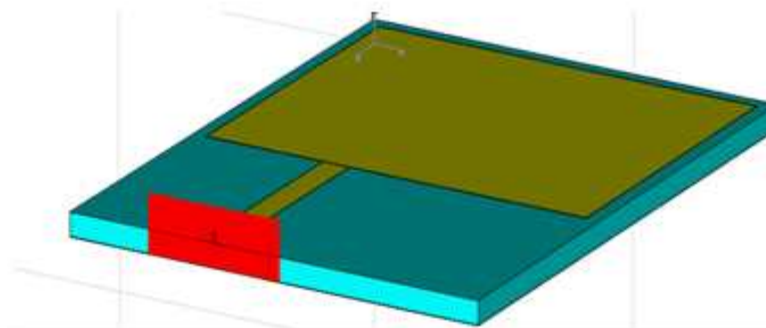


Figura 6.5 Antena1.

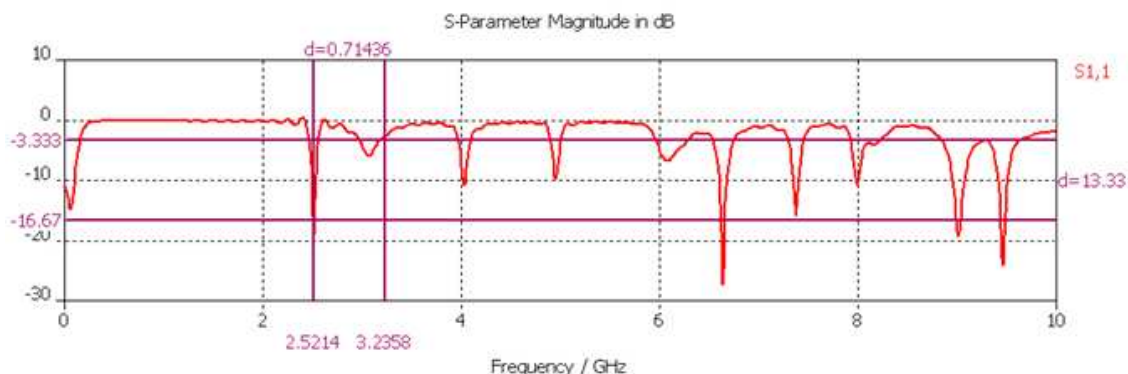


Figura 6.6 Gráfica adaptación antena 1.

## 6.4 DISEÑO DEFINITIVO

A partir de los modelos anteriores se construye uno nuevo aumentando el tamaño del sustrato y centrando el parche. Definitivamente es un parche de 23 milímetros de largo, 29 milímetros de ancho y 35 micras de grosor alimentado por un strip de 2 milímetros de ancho y 29 milímetros de largo sobre un dieléctrico de cobre y FR 4 de 62 milímetros de largo y 80 milímetros de ancho. [Figura 6.7 y Figura 6.10]

El laminado FR4 PCB es el material base más utilizado para circuitos impresos, el FR viene de "Flame Retardant" y el 4 hace referencia a la fibra de vidrio impregnada de resina epoxi. El material FR4 tiene una constante dieléctrica de 4.9 y una permeabilidad de 1.

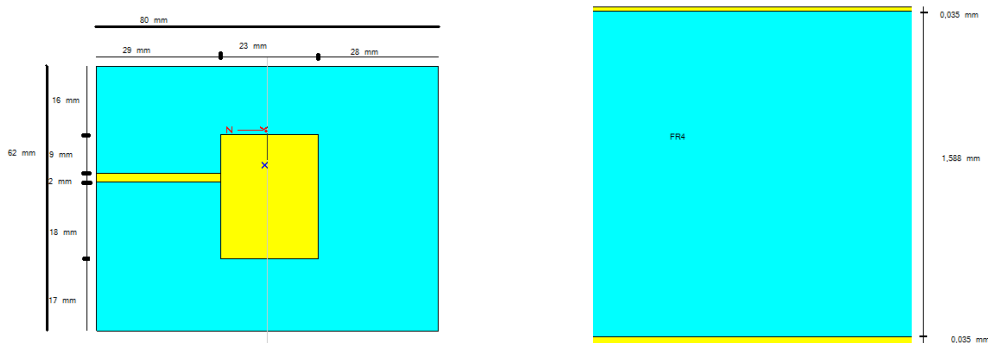


Figura 6.7 Vista superior y lateral de la antena.

En las opciones de la simulación se elige 500 ciclos para que la señal de excitación le de tiempo a bajar a -80 decibelios, [Figura 6.8 y Figura 6.9] se obtiene una señal de adaptación con un pico de -24.08 decibelios a 2.4 GHz y dos picos secundarios a en torno 3.8 GHz y 4.6 GHz de -5 y -8 decibelios aproximadamente consiguiendo quitar todos los picos secundarios que se obtenían en modelos anteriores.

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

[Figura 6.11 y Figura 6.12 ] Para ver la directividad de la antena se define un monitor de campo lejano a 2.4 GHz y se vuelve a repetir la simulación obteniendo un diagrama de radiación en 3 dimensiones que nos indica que la antena radía por igual en todas las direcciones del plano del sustrato hacia arriba, también se puede realizar un corte en el plano que se desee y ver el diagrama polar en 2 dimensiones [Figura 6.14 ]. También nos da una eficiencia de radiación de 1.058 decibelios .[ Figura 6.13 ]

Las medidas obtenidas son buenas pero mejorables, el ancho de banda de la antena es de 79.2 KHz, estrecho pero es algo que es una característica de las antenas de parche. También la eficiencia de radiación de 1.058 decibelios es mejorable ya que cuanto más cercana a 0 decibelios mejor.

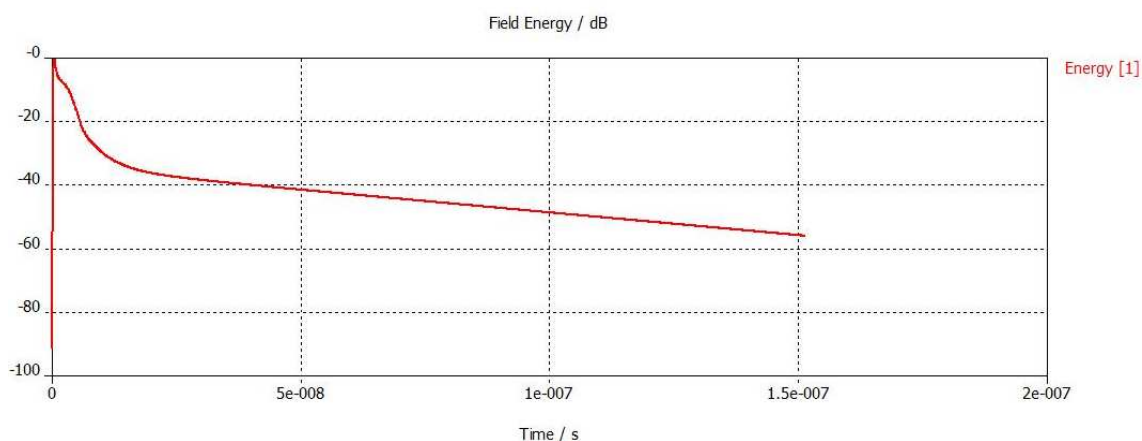


Figura 6.8 Descenso de la energía en el instante  $1.5 \cdot 10^{-7}$

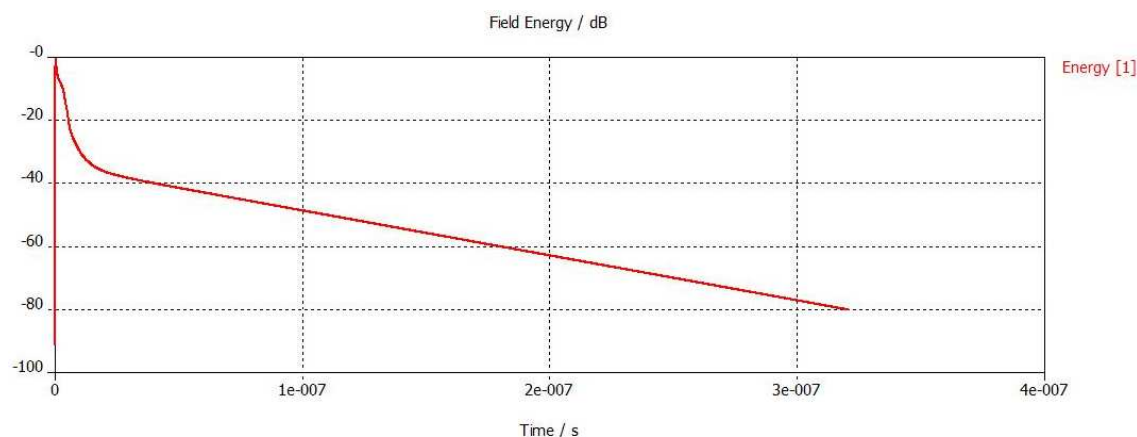


Figura 6.9 Descenso de la energía en el instante  $3 \cdot 10^{-7}$



# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

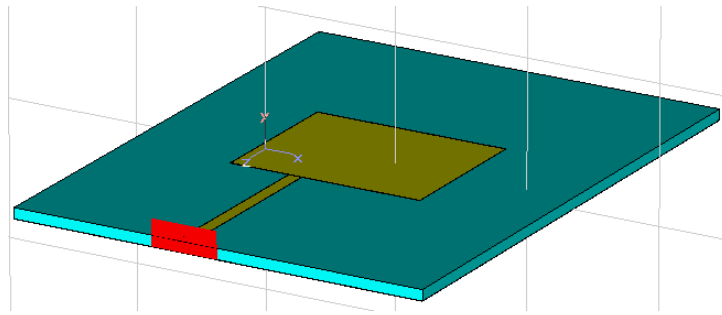


Figura 6.10 Antena.

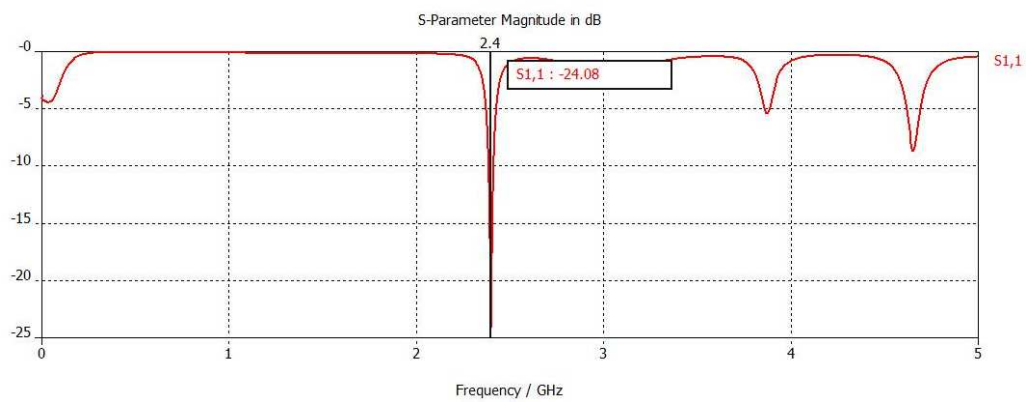


Figura 6.11 Gráfica de adaptación de la antena.

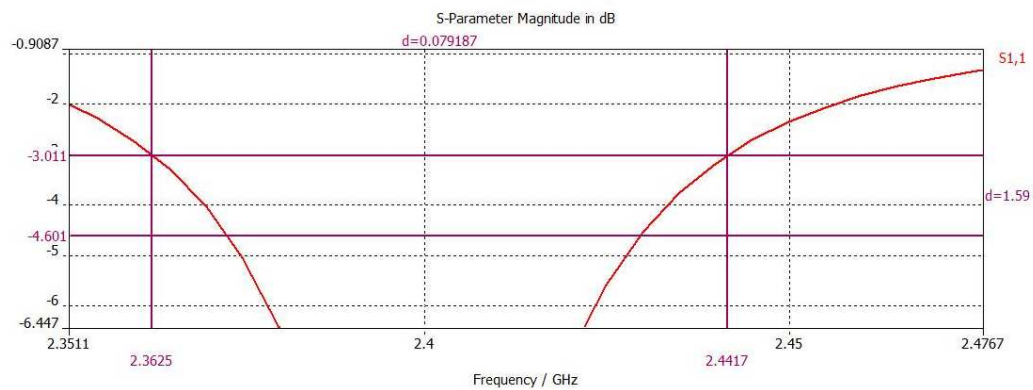


Figura 6.12 Detalle de la gráfica de adaptación de la antena.

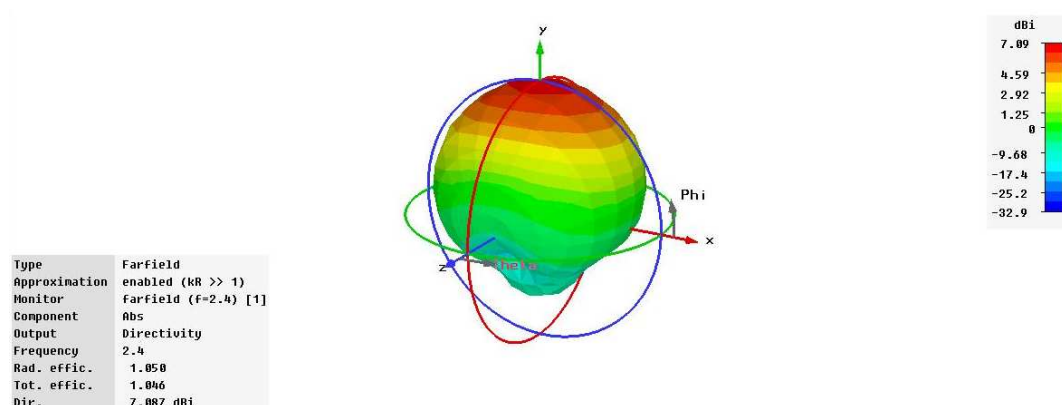


Figura 6.13 Gráfica de radiación de la antena.

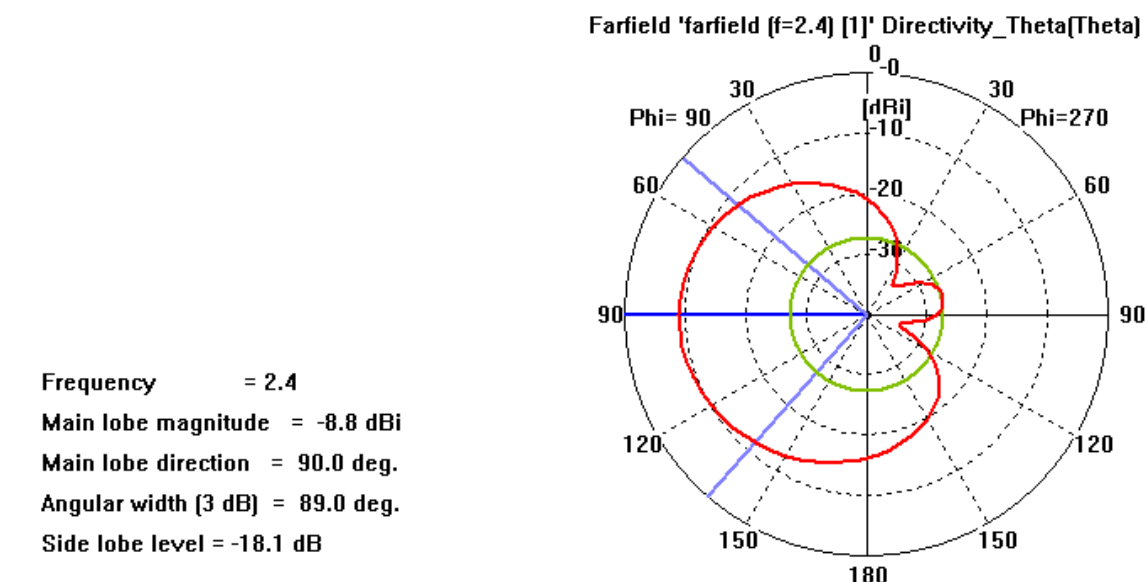


Figura 6.14 Diagrama polar de radiación de la antena.

## 6.5 FABRICACIÓN Y MEDIDA

Para el proceso de fabricación se realiza un dibujo de la vista superior de la antena. Es suficiente dibujarlo en 2 dimensiones ya que lo que interesa son las dimensiones de anchura y longitud del sustrato y del parche y no el grosor que vendrá determinado por el sustrato que introduzcamos en la maquina. El sustrato FR 4 está recubierto de cobre por ambas caras, como en el diseño la base es tierra no retiramos el cobre de la cara inferior, en la cara superior retiramos el cobre dejando el dibujo del parche y del conductor.

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

A continuación se exporta el plano de la antena en formato DXF al Circuitcam, éste programa cambia el formato de archivo a fin de que lo pueda leer la fresadora. Se utiliza la fresadora mecánica, modelo LPKF Protomat H 100, ya que el modelo a fabricar es lo suficientemente sencillo, si el circuito impreso a fabricar fuera más complejo y tuviera pistas estrechas se utilizaría otra fresadora láser. Se coloca la plancha de sustrato en la fresadora, para evitar que se mueva mientras se realiza el trabajo la fresadora tiene una aspiradora que la mantiene fija, es por eso que cubrimos con papel la superficie que no es cubierta por el sustrato. La fresadora se maneja a través de un programa donde se puede elegir las brocas que va utilizar la máquina para recortar el sustrato y para retirar en nuestro caso el cobre sobrante, brocas muy finas de 0.25 mm para las hendiduras, brocas finas, de 0.8 mm para hacer el contorno del parche y el conductor y más anchas, 3 mm para vaciar. Una vez que todo está bien, la fresadora automáticamente hace todo el proceso recortando el sustrato de la plancha primero, dibujando el parche luego y limpiando todo el cobre de la capa superior sobrante.[ Figura 6.15 y Figura 6.16 ]



Figura 6.15 Detalle de la colocación de la plancha de FR4 en la fresadora.

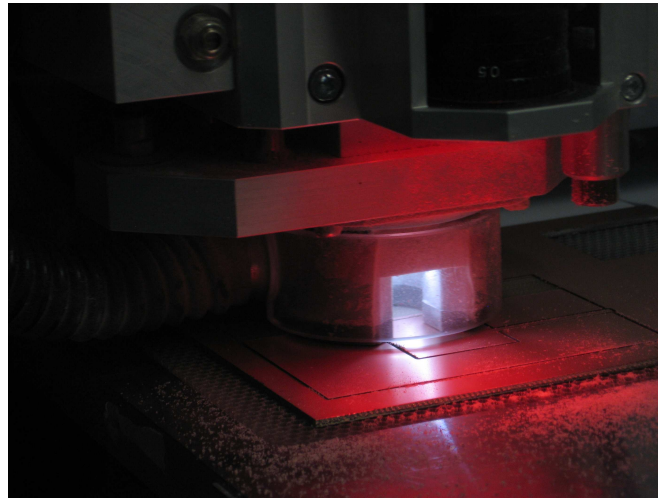


Figura 6.16 Detalle de la fresadora recortando el parche de la antena.

A continuación se le coloca a la antena el conector SMA y se suelda con estaño. Por último realizamos la medida del  $S_{11}$  mediante el analizador de redes Network Analyzer 8722ES. [ Figura 6.17] Antes de realizar una medida hay que calibrar el equipo para que la medida sea válida, si la medida a realizar es la  $S_{11}$  solo es necesario realizar la calibración en el puerto 1. Para llevar a cabo la calibración se conecta al puerto una carga de 50 ohmios, un corto y un abierto. Conectándolos al puerto el analizador de redes lleva a cabo la calibración automáticamente. Si se quiere realizar medidas de transmisión se debe realizar la calibración realizada con el puerto 1 también en el puerto 2 y también unir los dos puertos.

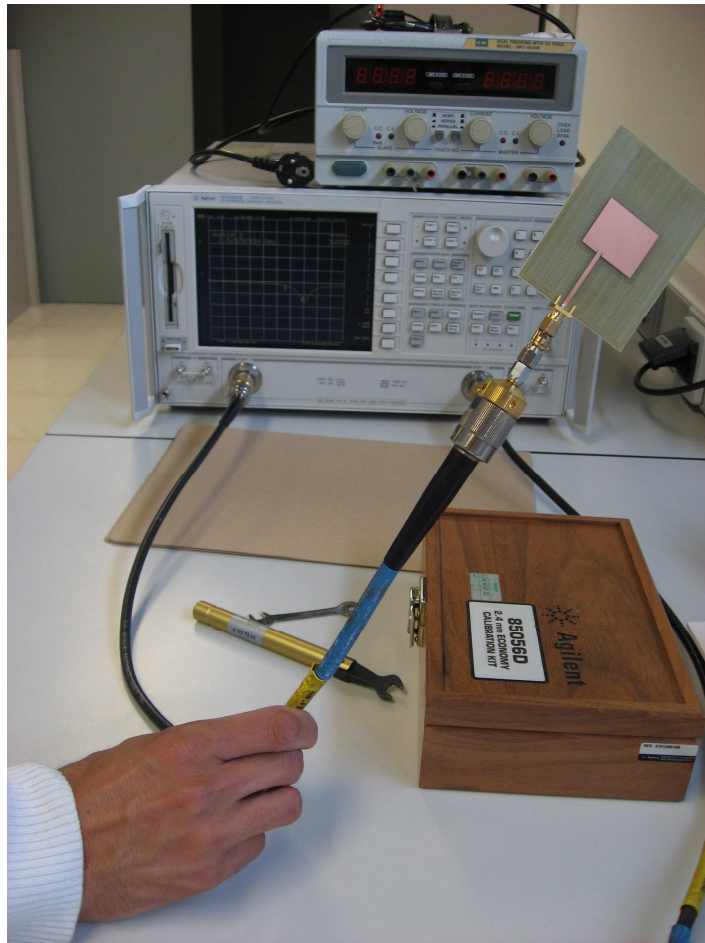


Figura 6.17 Medida con el analizador de redes.

La medida realizada con el analizador de redes confirma los resultados obtenidos en el programa aunque los resultados son algo peores en la realidad que en la simulación del software obteniendo un pico a 2.5 GHz de unos -13.5 decibelios.[ Figura 6.18]

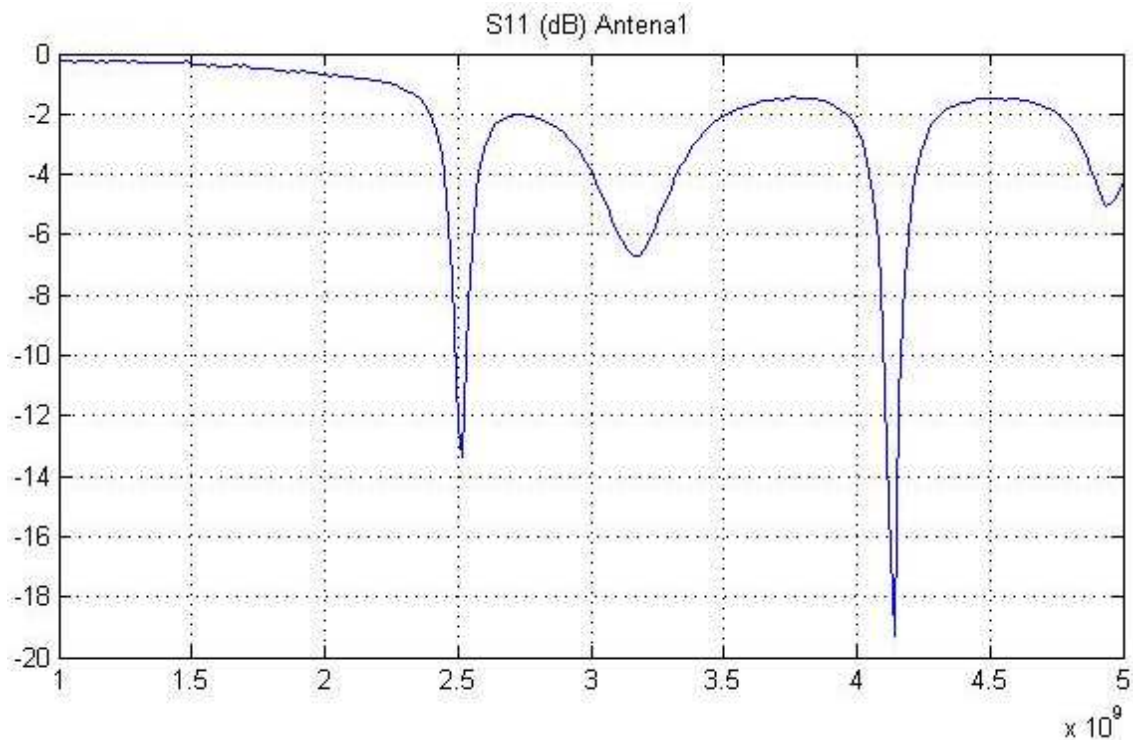


Figura 6.18 Medida de adaptación de la antena 1 realizada con el analizador de redes

### 6.6 ANTENA CON HENDIDURAS

El siguiente paso es diseñar un segundo modelo para intentar mejorar la eficiencia y el ancho de banda, el modelo a diseñar se basa en la antena realizada anteriormente añadiendo dos hendiduras a ambos lados de la stripline que se introducen en el parche. [ Figura 6.19 y Figura 6.20 ]

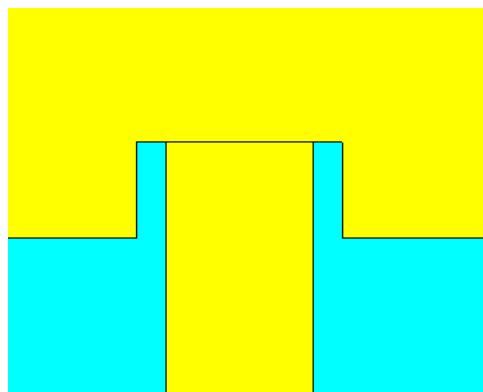


Figura 6.19 Detalle de las hendiduras en el parche.

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

Después de haber diseñado la primera antena, ésta tarea resulta mucho más sencilla ya que con el mismo sustrato y parche se le añaden dos hendiduras en el parche a la altura del strip.

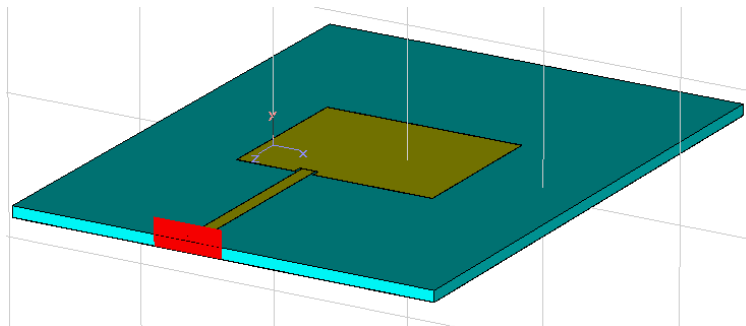


Figura 6.20 Antena con hendiduras.

Las mayores dificultades surgen para averiguar las dimensiones de éstas hendiduras y a la hora de hacer la simulación ya que el programa da un error porque el diseño es inestable. [Figura 6.21] Las medidas de éstas hendiduras se deducen de forma empírica pero la imposibilidad de realizar las simulaciones impide comprobar los efectos de variar el tamaño y la profundidad de las hendiduras. Tras unas consultas con el tutor se decide que las hendiduras entren una décima parte de la longitud del parche y haya una separación de 100 micras entre el stripline y el parche.

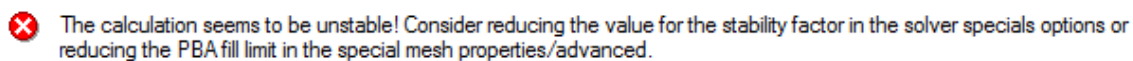


Figura 6.21 Error del CST.

La inestabilidad tiene su origen en las posibles realimentaciones que se producen en el modelo. En una antena real, la energía de excitación que apliquemos a la misma se va a desvanecer con el tiempo, sin embargo en el modelo simulado en el ordenador puede ocurrir que la solución a las ecuaciones de Maxwell dependan de momentos futuros con lo que el ordenador no es capaz de dar un resultado y da el aviso de error debido a una inestabilidad en el cálculo. La aplicación de una malla adaptativa al diseño que se adapte a puntos problemáticos como las esquinas conlleva que el programa lleva a cabo su discretización de las ecuaciones de Maxwell en los puntos del diseño adaptados a la geometría del mismo y no en puntos de la estructura cogidos arbitrariamente. La utilización de la malla adaptativa conlleva un cálculo mucho más largo que el ordenador con el que se han realizado los cálculos anteriores no es capaz de realizar, ésta simulación se lleva a cabo en el ordenador del tutor.

Los resultados no mejoran los resultados anteriores y se diseña otra antena, en ésta las hendiduras entran 1.3 milímetros en el parche con una separación de 0.4 mm. [Figura 6.22] Éste segundo modelo nos da una adaptación con un pico de -29.9 decibelios a 2.43 Ghz y una eficiencia de radiación de 0.2 decibelios. [Figura 6.23 y Figura 6.24]



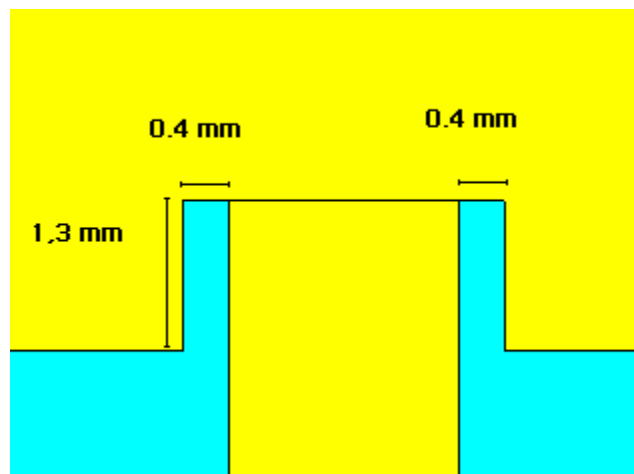


Figura 6.22 Medidas de las hendiduras.

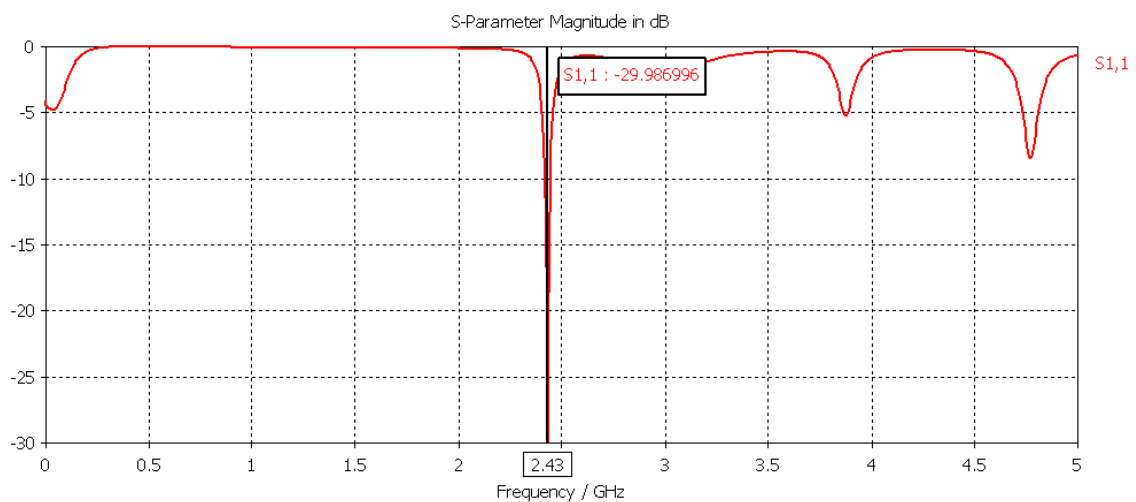


Figura 6.23 Medida de adaptación de la antena con hendiduras.



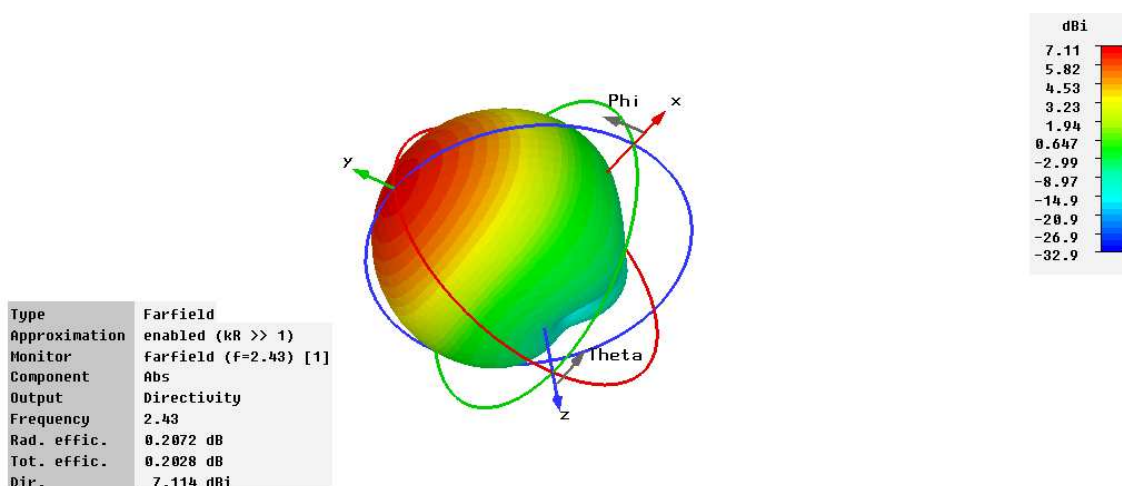


Figura 6.24 Diagrama de radiación de antena con hendiduras.

## 6.7 COMPARACIÓN

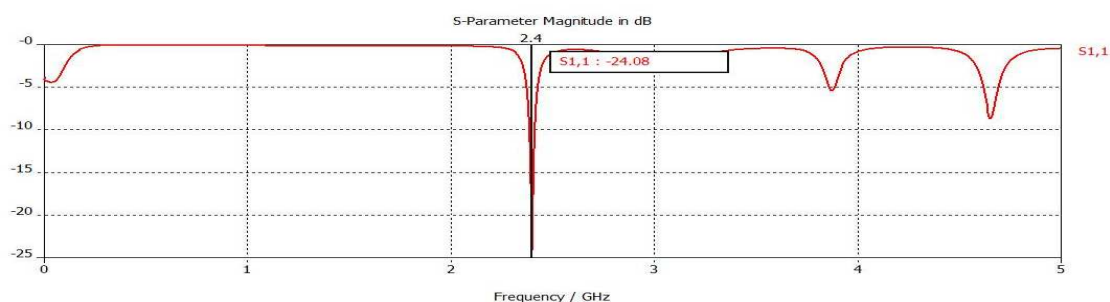


Figura 6.25 Gráfica adaptación S11 de antena sin hendiduras (CST).

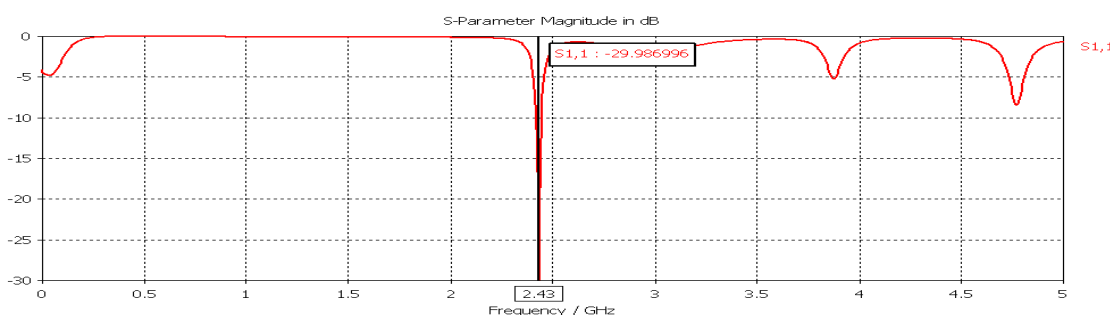


Figura 6.26 Gráfica de adaptación S11 de antena con hendiduras (CST).

Aquí se muestran las gráficas de adaptación de las antenas con y sin hendiduras respectivamente obtenidas a partir del transient solver del programa CST. [Figura 6.25 y Figura 6.26]

Siendo la base el mismo sustrato y el mismo tamaño de parche y la única diferencia las hendiduras se observa cómo éstas producen un ligero desplazamiento del pico del S11 a

la derecha pasando de 2.4 GHz a 2.43 GHz. También se nota una mejoría en la adaptación pasando de -24.08 decibelios a -29.9 decibelios. Las dos antenas tienen a su vez dos picos secundarios de -5 y -8 decibelios a 3.8 GHz y a 4.8 GHz respectivamente. Una vez construidas las dos antenas se realizaron las medidas de adaptación con el analizador de redes Agilent dando peores medidas de adaptación, la adaptación de la primera antena pasó de -24.08 decibelios a -13.4 decibelios y la antena con hendiduras pasó de -29.9 decibelios a -16 decibelios a 2.5 GHz. El pico se desplaza a la derecha ligeramente y tiene menos amplitud pero la forma de la gráfica se mantiene. La explicación estriba en las tolerancias de fabricación y a que la antena parche es muy resonante. [Figura 6.27 , Figura 6.28 y Figura 6.29 ]

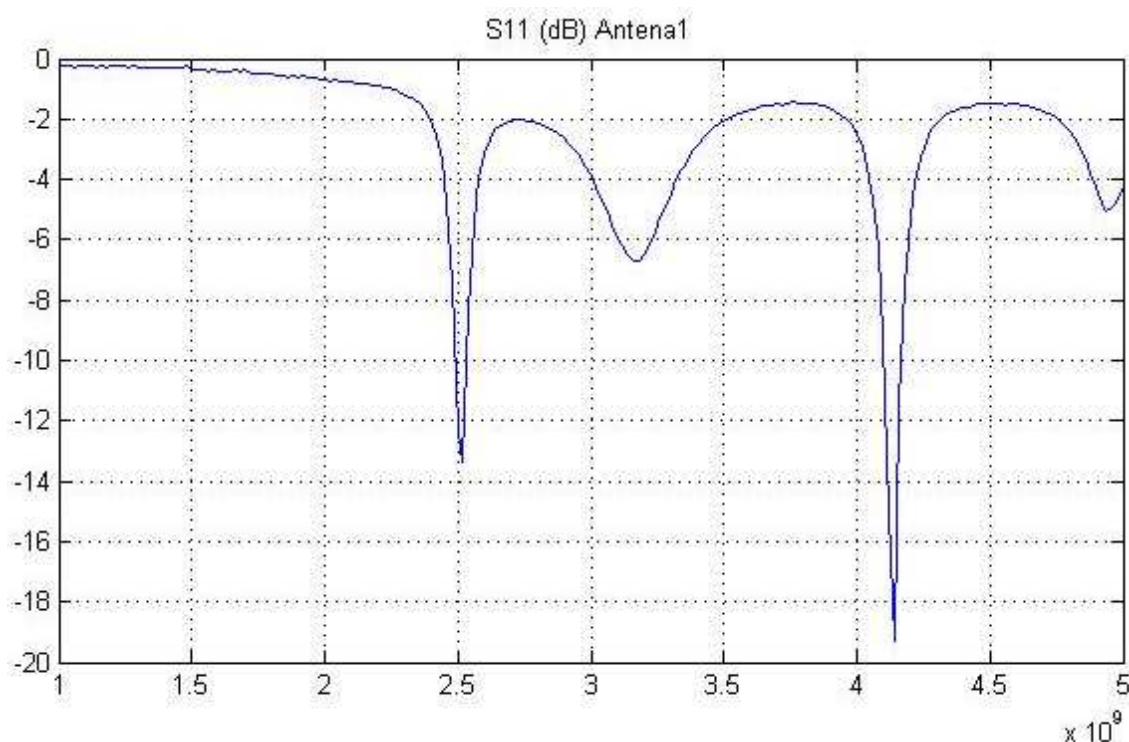


Figura 6.27. Gráfica de adaptación antena sin hendiduras (Analizador de redes).

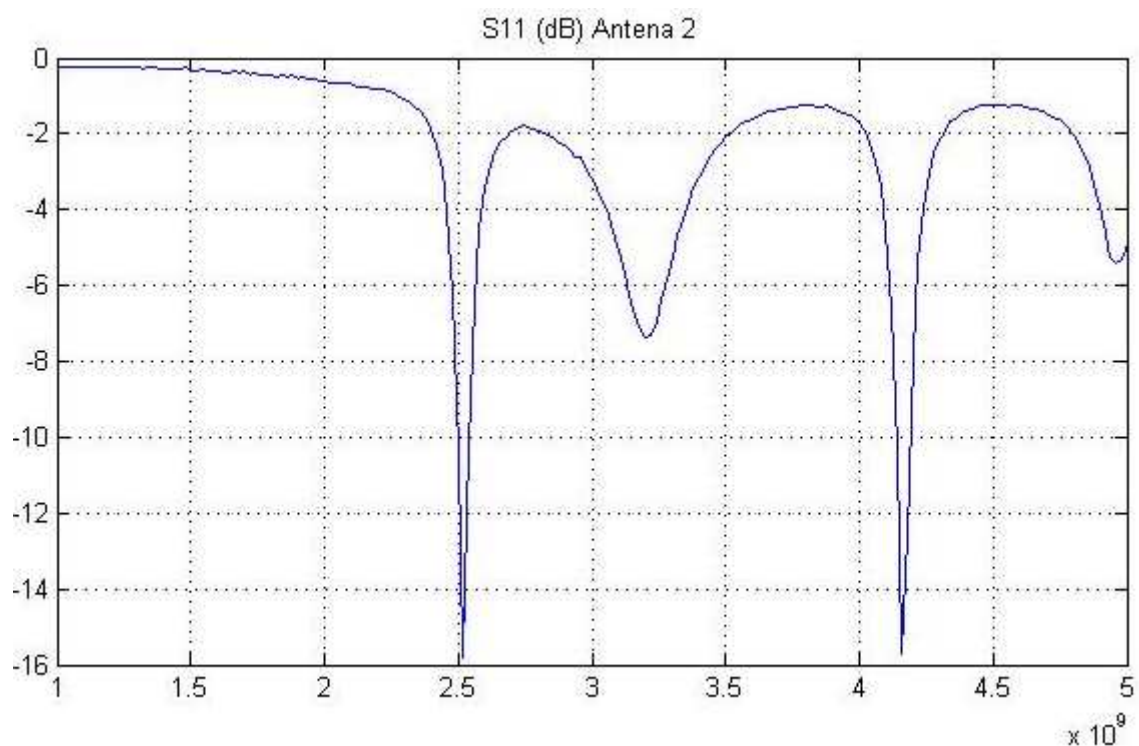


Figura 6.28. Gráfica de adaptación antenna con hendiduras (Analizador de redes).

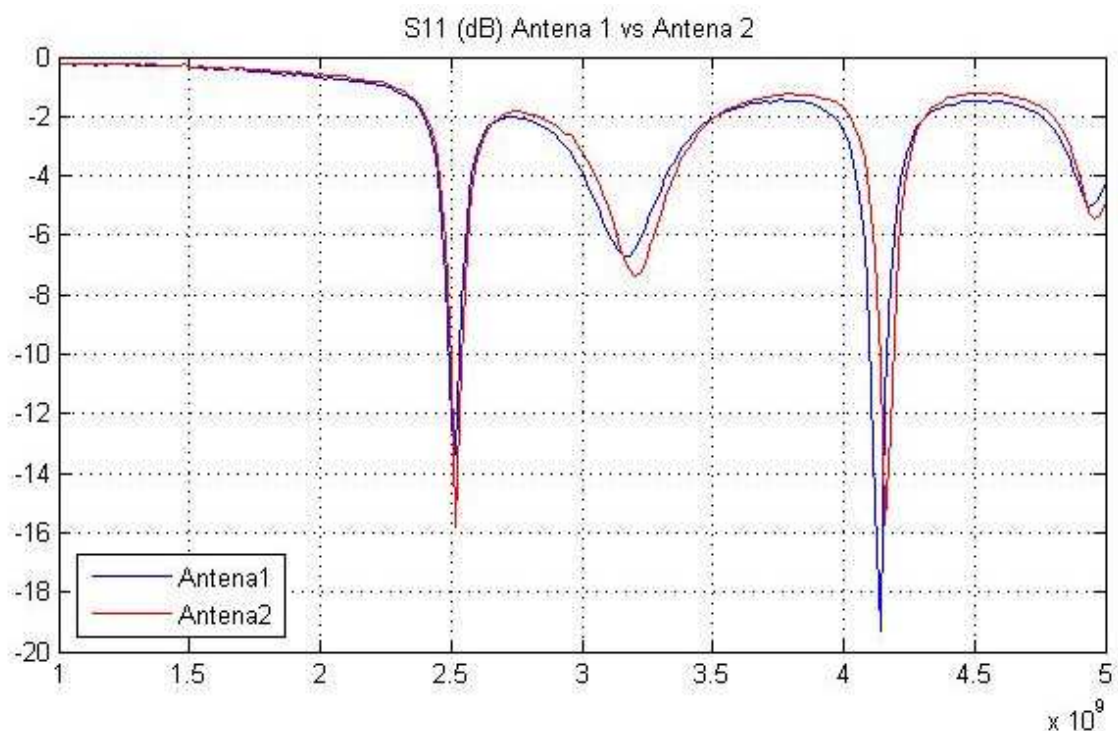


Figura 6.29 Gráfica de comparación adaptación antenna sin hendiduras y con hendiduras (Analizador de redes).

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

## 6.8 MEDIDA DIRECTIVIDAD

Por último se realiza una medida de la directividad con el analizador de redes Agilent, para ello se utilizan las 2 antenas construidas como si fueran antenas idénticas de manera que una transmite y la otra recibe. Conectadas a los dos puertos del analizador se colocan enfrentadas una antena respecto de la otra, la antena de la que se va a realizar la medida de directividad se queda fija mientras que con la otra vamos desplazandola trazando un cuarto de circunferencia y manteniendo siempre una distancia de 50 centímetros. Como las sondas no dan otra opción la circunferencia que se describe con la antena que desplazamos sigue la circunferencia Phi del sólido de revolución de la simulación, en el plano XY

Estas son las medidas obtenidas con el analizador de redes siendo la A1 la primera antena realizada y la A2 el siguiente diseño con hendiduras. [Tabla 6.1]

|         |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
|---------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|         | 0 <sup>0</sup> | 15 <sup>0</sup> | 30 <sup>0</sup> | 45 <sup>0</sup> | 60 <sup>0</sup> | 75 <sup>0</sup> | 90 <sup>0</sup> | 180 <sup>0</sup> |
| A2 fija | -30.47         | -30.95          | -31.7           | -33.39          | -34.87          | -37.73          | -41.32          | -47.22           |

|         |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
|---------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|         | 0 <sup>0</sup> | 15 <sup>0</sup> | 30 <sup>0</sup> | 45 <sup>0</sup> | 60 <sup>0</sup> | 75 <sup>0</sup> | 90 <sup>0</sup> | 180 <sup>0</sup> |
| A1 fija | -30.77         | -30.5           | -33.18          | -35.18          | -35.46          | -37.0           | -37.05          | -45.85           |

Tabla 6.1 Medidas obtenidas con el analizador de redes.

Estas medidas obtenidas con el analizador de redes se comparan con las obtenidas en el corte vertical en el plano Phi de el diagrama de radiación extrapoladas a los valores obtenidos con el analizador de redes. [Figura 6.30 y Figura 6.31]  
[Tabla 6.2 y Tabla 6.3]

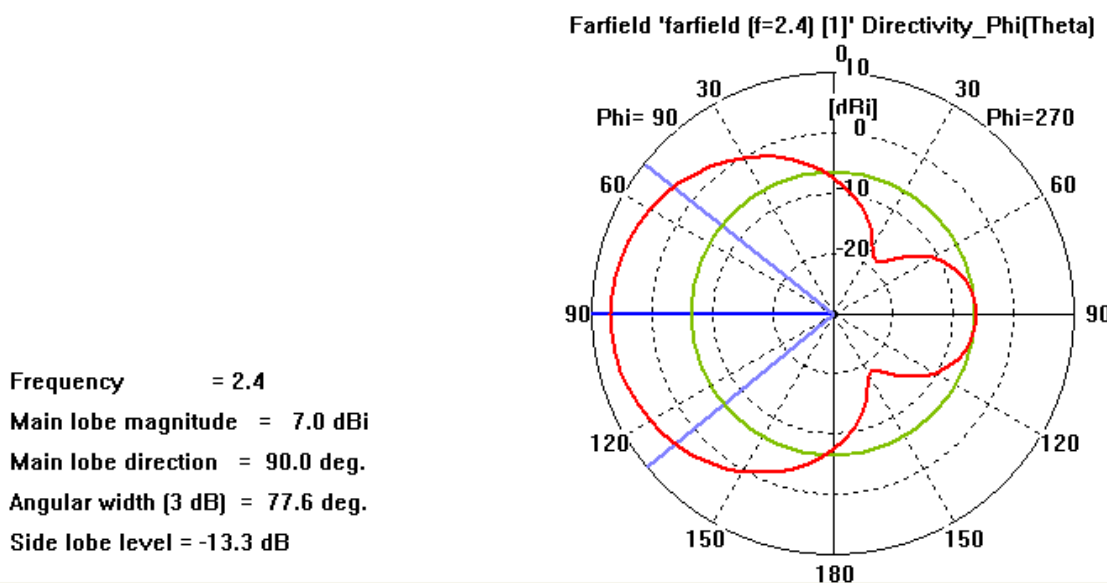


Figura 6.30 Diagrama polar

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

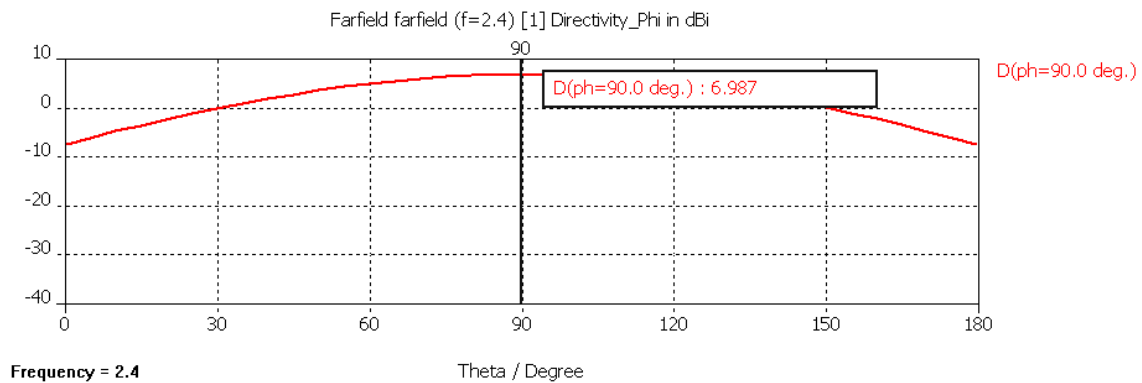


Figura 6.31 Diagrama cartesiano de radiación en el plano Phi de la primera antena.

|            | 0<br>grados | 15<br>grados | 30<br>grados | 45<br>grados | 60<br>grados | 75<br>grados | 90<br>grados |
|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| simulacion | -30,77      | -31,19       | -32,53       | -34,70       | -37,58       | -41,40       | -45,01       |
| medida     | -30,77      | -30,50       | -33,18       | -35,18       | -35,46       | -37,00       | -37,05       |

Tabla 6.2 Medidas de la simulación de la antena sin hendiduras extrapoladas y medidas obtenidas con el analizador de redes de la antena sin hendiduras obtenidas.

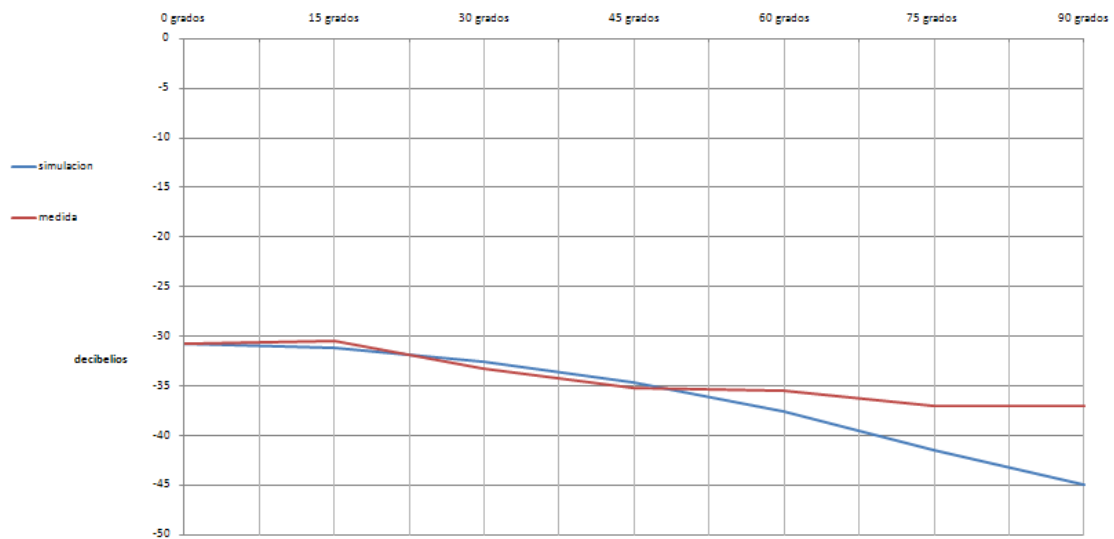


Figura 6.32 Comparación entre la medida de radiación de la antena sin hendiduras y el diagrama de radiación de la simulación de la antena sin hendiduras.

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

|            | 0 grados | 15<br>grados | 30<br>grados | 45<br>grados | 60<br>grados | 75<br>grados | 90 grados |
|------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| simulación | -30,77   | -31,19       | -32,53       | -34,7        | -37,58       | -41,4        | -45,01    |
| medida     | -30,77   | -30,95       | -31,7        | -33,39       | -34,87       | -37,73       | -41,32    |

Tabla 6.3 Medidas de la simulación de la antena sin hendiduras extrapoladas y medidas obtenidas con el analizador de redes de la antena con hendiduras obtenidas.

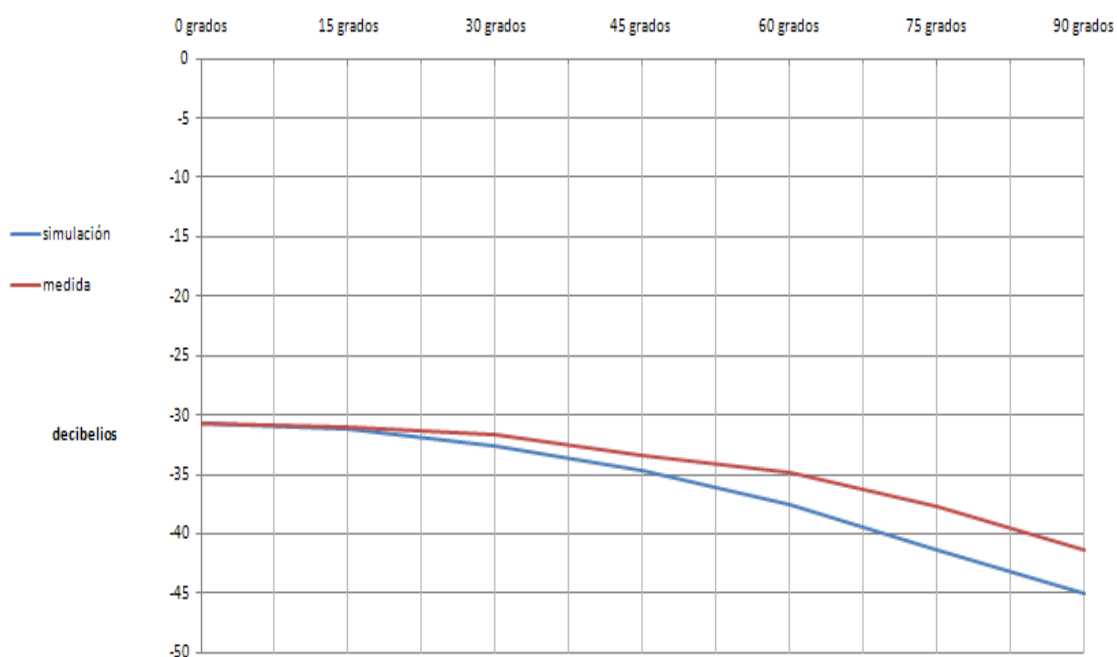


Figura 6.33 Comparación entre la medida de radiación de la antena con hendiduras y el diagrama de radiación de la simulación de la antena sin hendiduras.

Se puede observar que la eficiencia de radiación descende conforme te alejas de la dirección de máxima radiación lo cual es lógico, pero ésta decae más y más rápidamente en la simulación que en la medida realizada con el analizador de redes, probablemente debido a que la medida se realiza en campo próximo y a la presencia de múltiples reflexiones. [Figura 6.32 y Figura 6.33] Así tenemos que la directividad en la dirección de máxima radiación es de 7 decibelios y decae hasta - 7 decibelios aproximadamente a 90 grados de la dirección axial, es decir decae unos 15 decibelios en la simulación obtenida por ordenador mientras que en la medida realizada con el analizador decae sólo 7 decibelios, el máximo está en -30.7 decibelios y el mínimo en -37.05 decibelios. En la segunda antena ocurre lo mismo pero con unos 11 decibelios frente a los 15 decibelios de diferencia del primer caso.

## 7 COMPARACIÓN

Una vez se tienen los resultados de las simulaciones de las dos antenas diseñadas y las medidas de las dos antenas construidas se pueden sacar las conclusiones pertinentes, éstas han proporcionado información de la adaptación de la antenna, la directividad y la eficiencia de radiación.

### 7.1 ADAPTACIÓN

La adaptación o parámetro de dispersión  $S_{11}$  nos da una idea de la transferencia de potencia de la línea de transmisión a la antenna, en el primer modelo simulado se obtiene una señal de adaptación con un pico de -24.08 decibelios a 2.4 GHz y dos picos secundarios a en torno 3.8 GHz y 4.6 GHz de -5 y -8 decibelios.[ Figura 7.1] Al realizar la medida del parámetro  $S_{11}$  con el analizador de redes Agilent de éste primer modelo construido tenemos que su mínimo pasa de -24.08 decibelios a -13.4 decibelios y se desplaza en frecuencia de 2.4 GHz a 2.5 GHz, es decir empeora notablemente. Tenemos también dos picos secundarios a en torno 3.8 GHz y 4.16 GHz de -5 y -8 decibelios, el pico secundario a 4.6 GHz pasa de -8 decibelios a -19.5 decibelios superando la amplitud del pico principal y se desplaza en frecuencia hacia la izquierda a 4.16 GHz.[ Figura 7.2]

La explicación de éstas diferencias obtenidas de la simulación y la medida con el analizador de redes estriban en las tolerancias de fabricación y a que la antenna parche es muy resonante.

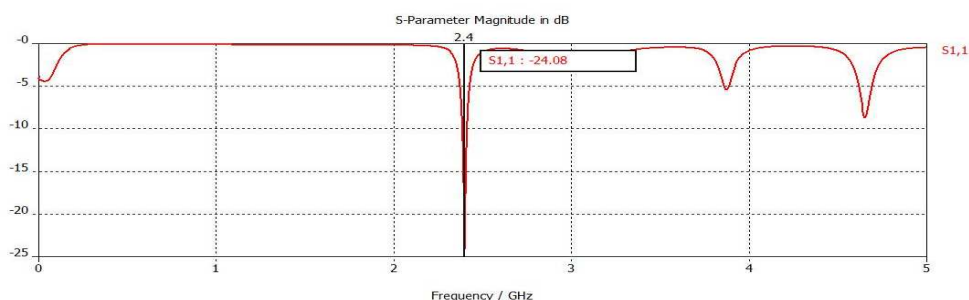


Figura 7.1 Gráfica adaptación  $S_{11}$  de antena sin hendiduras (CST).



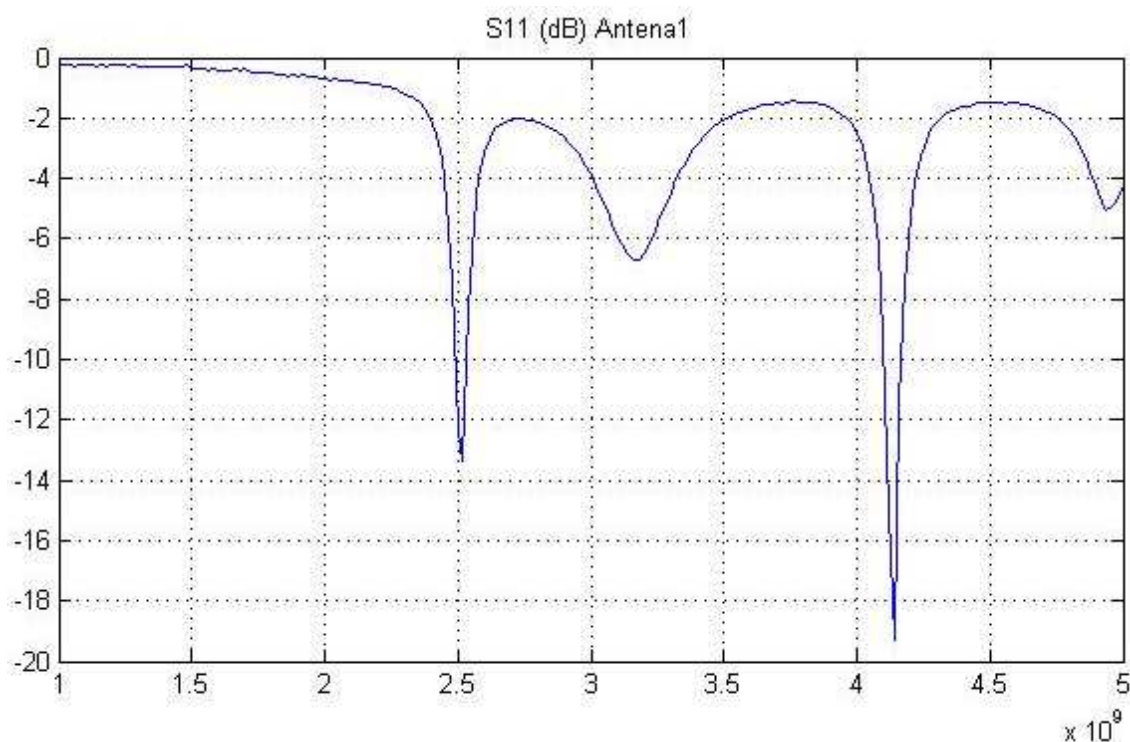


Figura 7.2 Gráfica de adaptación antena 1 (Analizador de redes).

En el segundo modelo simulado mejora el parámetro S11 obtenido en el primer modelo, se obtiene una gráfica de adaptación similar a la obtenida en la antena sin hendiduras pero ligeramente desplazada a la derecha. La señal de adaptación obtenida en la simulación tiene un pico de -29.9 decibelios a 2.43 GHz y dos picos secundarios a en torno 3.8 GHz y 4.6 GHz de -5 y -8 decibelios.[ Figura 7.3] Al realizar la medida del parámetro S11 con el analizador de redes Agilent de la primera antena construida tenemos que su mínimo pasa de -24.08 decibelios a -13.4 decibelios a la frecuencia de a 2.4 GHz, es decir empeora notablemente. [Figura 7.4] Tenemos también dos picos secundarios a en torno 3.8 GHz y 4.6 GHz de -5 y -8 decibelios los cuales se mantienen en frecuencia y amplitud en la medida realizada con el analizador de redes excepto el pico secundario a 4.6 GHz que pasa de -8 decibelios a -19.5 decibelios superando la amplitud del pico principal.[ Figura 7.5]



## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

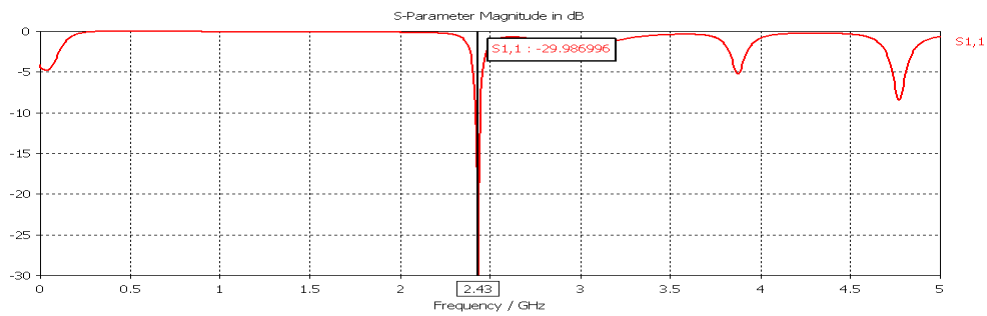


Figura 7.3 Gráfica de adaptación S11 de antena con hendiduras (CST).

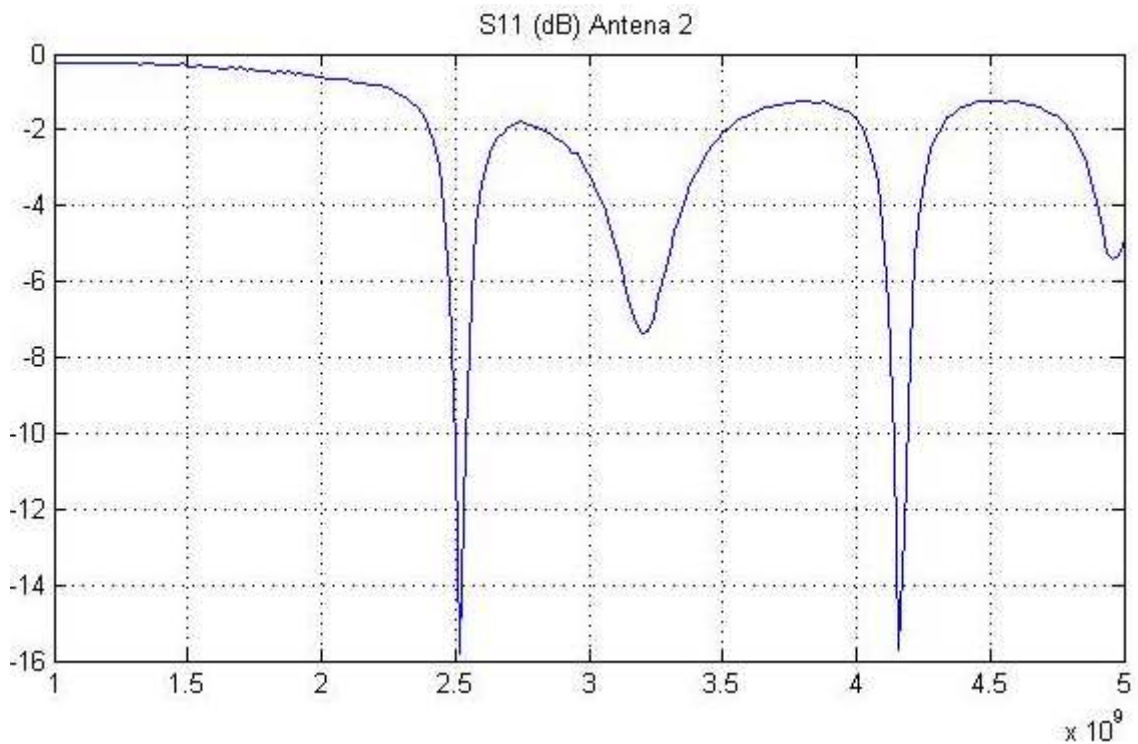


Figura 7.4 Gráfica de adaptación antena con hendiduras (Analizador de redes).

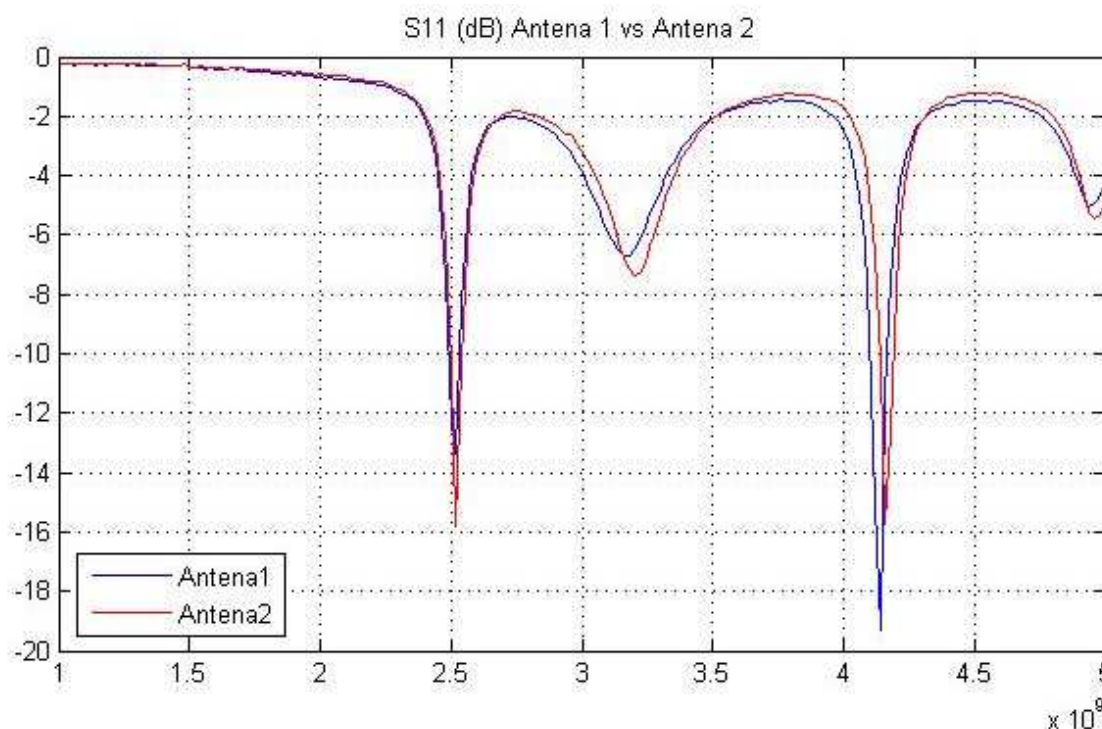


Figura 7.5 Gráfica de comparación adaptación antena sin hendiduras y con hendiduras (Analizador de redes).

En resumen, gracias a las inserciones realizadas en el parche, se ha logrado mejorar la adaptación que era el propósito principal. Una vez construidas las dos antenas y medido el parámetro S11 con el analizador de redes se ha observado que los resultados no son tan buenos como en la simulación, los picos salen desplazados levemente en frecuencia hacia la derecha y el pico secundario de mayor frecuencia se incrementa notablemente en amplitud. La explicación de éstas diferencias obtenidas de la simulación y la medida con el analizador de redes estriban en las tolerancias de fabricación y a que la antena parche es muy resonante.

### 7.2 EFICIENCIA Y DIRECTIVIDAD

La eficiencia se puede definir como la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma, o lo que es lo mismo la relación entre la ganancia y la directividad. La eficiencia está entre 0 y 1, si una antena no tiene pérdidas, la directividad y la ganancia son iguales.

Las eficiencias de radiación y totales nos las da la simulación tras haber definido un monitor de campo lejano a la frecuencia de resonancia, así tenemos que en la primera

antena diseñada tenemos una eficiencia de radiación de 1.058 decibelios y al realizar las inserciones en el parche se logra una eficiencia de 0.207 decibelios lo cual es una buena medida ya que cuanto mas cercano a 0 decibelios mejor. [Figura 7.6 y Figura 7.7]

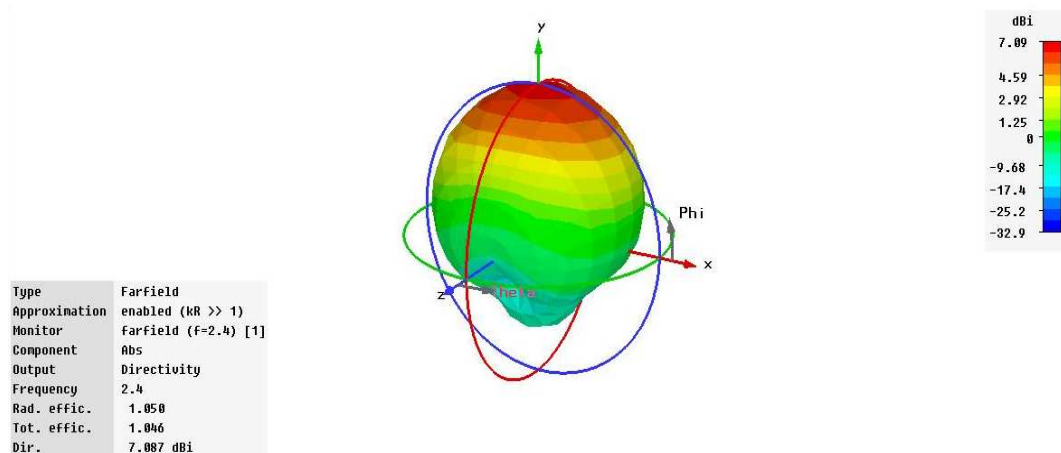


Figura 7.6 Gráfica de radiación de la antena sin hendiduras.

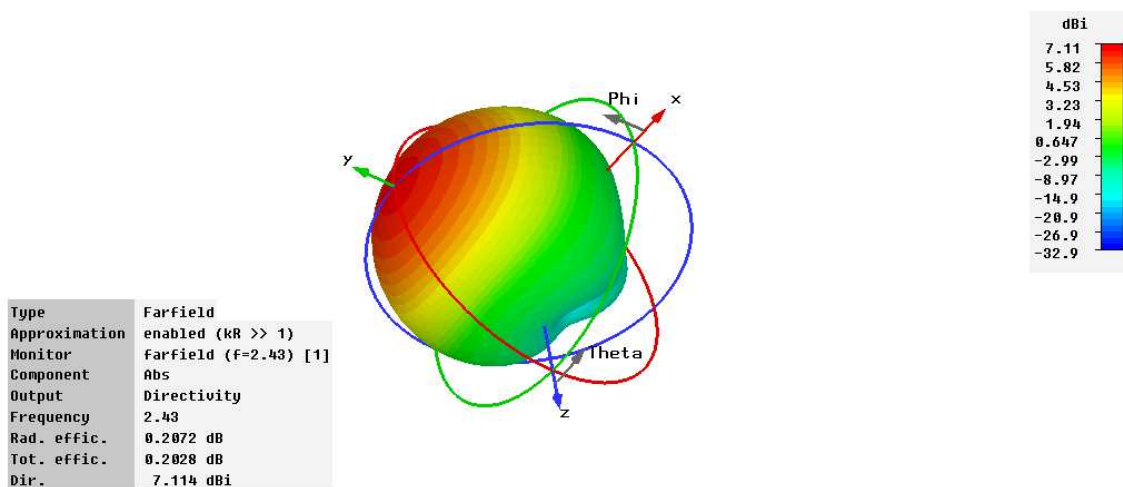


Figura 7.7 Diagrama de radiación de antena con hendiduras.

La directividad de la antena es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una distancia dada y la densidad de potencia, que radiaría a esa misma distancia, una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena. Los resultados de las simulaciones son satisfactorios en este aspecto y se puede observar en los diagramas de radiación como la máxima radiación se produce en la dirección Y, es

## DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENA PLANA

decir, perpendicular al parche de la antena, y se va reduciendo la radiación conforme nos alejamos de ese eje Y.[Figura 7.6 y Figura 7.7]

Por último se realiza una medida de la directividad con el analizador de redes Agilent, para ello se utilizan las 2 antenas construidas como si fueran antenas idénticas de manera que una transmite y la otra recibe. Conectadas a los dos puertos del analizador se colocan enfrentadas una antena respecto de la otra, la antena de la que se va a realizar la medida de directividad se queda fija mientras que con la otra vamos desplazandola trazando un cuarto de circunferencia y manteniendo siempre una distancia de 50 centímetros. Como las sondas no dan otra opción la circunferencia que se describe con la antena que desplazamos sigue la circunferencia Phi del sólido de revolución de la simulación, en el plano XY. Estas medidas obtenidas con el analizador de redes se comparan con las obtenidas en el corte vertical en el plano Phi de el diagrama de radiación extrapoladas a los valores obtenidos con el analizador de redes.[ Figura 7.8]

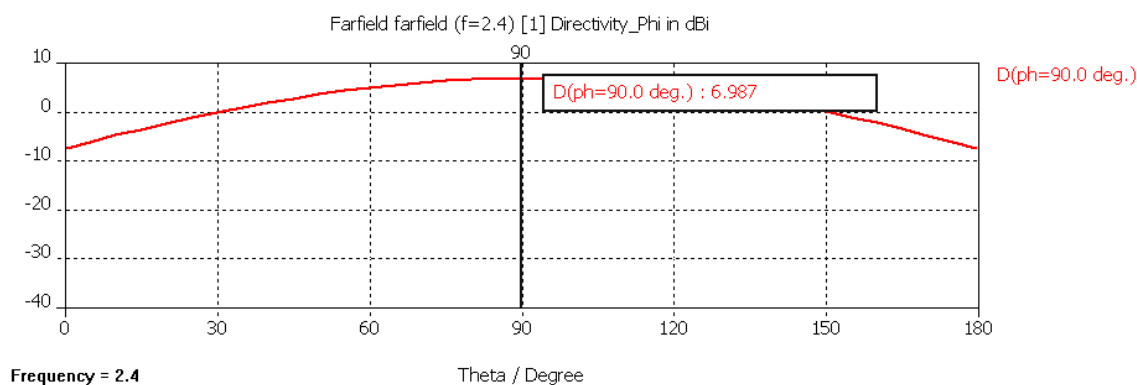


Figura 7.8 Diagrama cartesiano de radiación en el plano Phi de la primera antena.

Se puede observar que la eficiencia de radiación descende conforme te alejas de la dirección de máxima radiación lo cual es lógico, pero ésta decae más y más rápidamente en la simulación que en la medida realizada con el analizador de redes, probablemente debido a que la medida se realiza en campo próximo y a la presencia de múltiples reflexiones. [Figura 7.9 y Figura 7.10] Así tenemos que la directividad en la dirección de máxima radiación es de 7 decibelios y decae hasta -7 decibelios aproximadamente a 90 grados de la dirección axial, es decir decae unos 15 decibelios en la simulación obtenida por ordenador mientras que en la medida realizada con el analizador decae sólo 7 decibelios, el máximo está en -30.7 decibelios y el mínimo en -37.05 decibelios. En la segunda antena ocurre lo mismo pero con unos 11 decibelios frente a los 15 decibelios de diferencia del primer caso.

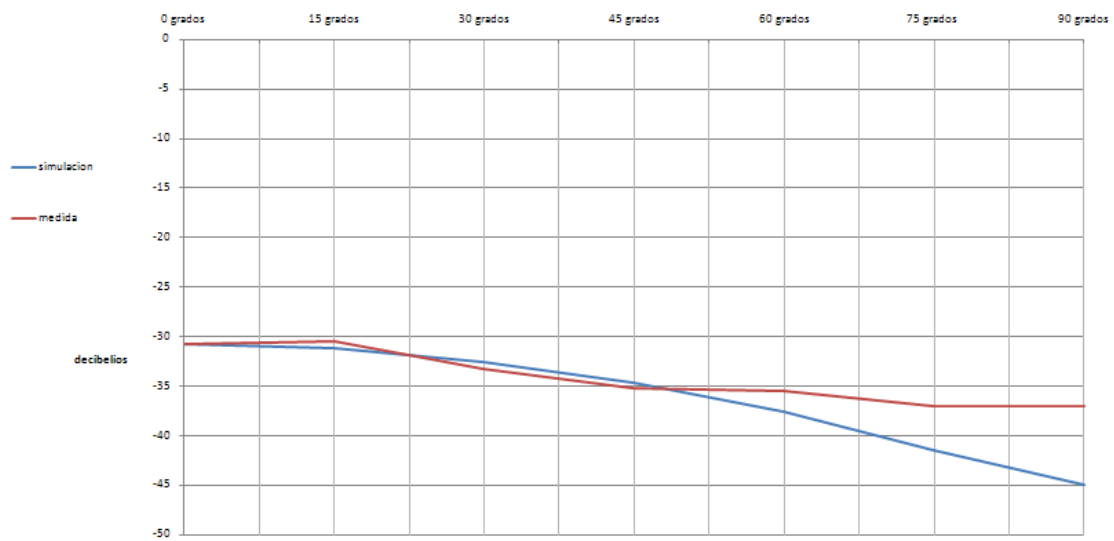


Figura 7.9 Comparación entre la medida de radiación de la antena sin hendiduras y el diagrama de radiación de la simulación de la antena sin hendiduras.

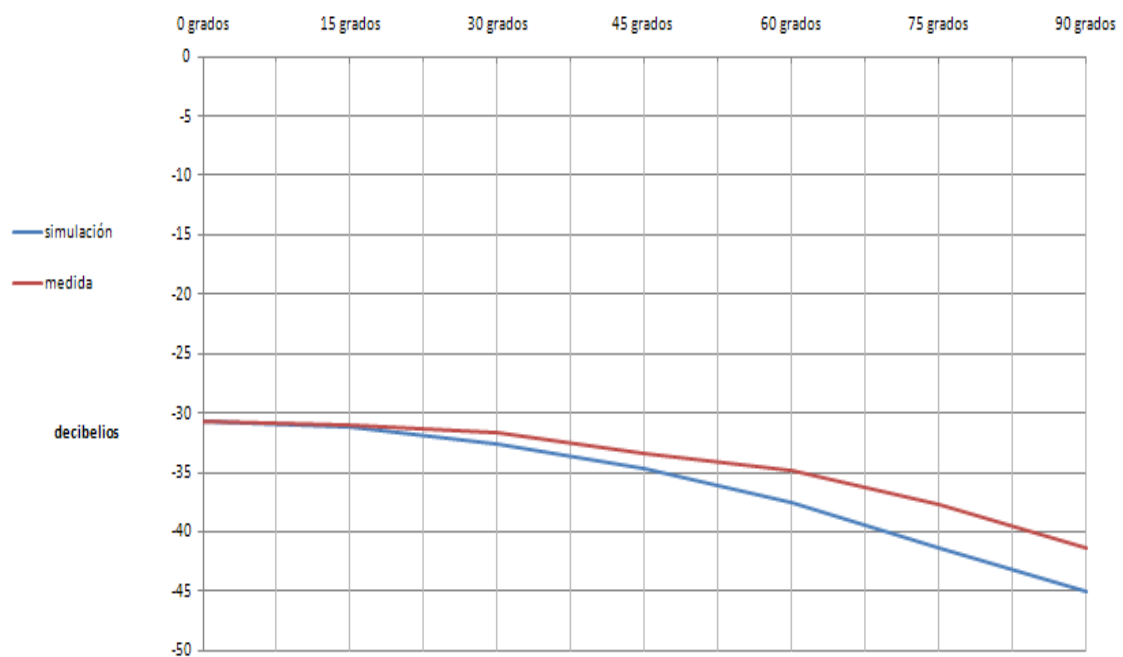


Figura 7.10 Comparación entre la medida de radiación de la antena 2 y el diagrama de radiación de la simulación de la antena 1.

## 8 CONCLUSIÓN Y VALORACIÓN ECONÓMICA

En este proyecto se ha detallado y descrito el proceso de diseño, fabricación, construcción y medida de una antena de parche rectangular. En este trabajo ha quedado constatado, que mediante el ensayo y error se puede llegar al diseño y a las características deseadas en cuanto a antenas de parche básicas se refiere con unos conocimientos muy básicos de antenas de parche y sin conocimientos de electromagnetismo.

### 8.1 DISEÑO

Dar con el diseño adecuado para que resuene a la frecuencia deseada es sencillo conociendo la longitud de onda y que las medidas del parche deben ser múltiplos de esa longitud de onda. Si no se utiliza ese dato lograr que la antena resuene a una frecuencia determinada es pura fortuna. También es importante a la hora de diseñar la antena utilizar desde el principio en las simulaciones el sustrato de que se disponga en el laboratorio si se quiere construir posteriormente la antena.

Tras realizar el primer modelo se procedió al diseño de un segundo modelo añadiendo unas inserciones en el mismo que entraban en el parche con el fin de mejorar la adaptación y la eficiencia de radiación. Tras varias tentativas se ha llegado a la conclusión de que efectivamente la mejora de adaptación de la antena y la eficiencia de radiación es significativa gracias a las inserciones.

No se ha podido encontrar información acerca de las inserciones en el parche y sus dimensiones recomendadas con lo que su diseño es empírico, de todos modos que entren una décima parte de la longitud del parche es un buen punto de partida.

Para evitar la inestabilidad en el cálculo de la simulación de la antena con inserciones se debe utilizar una malla adaptativa, el empleo de ésta malla adaptativa requiere de unos cálculos largos que necesitan de un ordenador potente para ser realizados.

### 8.2 CST

El CST Microwave Studio Suite es un programa muy completo para simulación electromagnética en 3 dimensiones con infinitas aplicaciones y funciones, sin embargo para diseñar y simular una antena de parche es necesario utilizar una mínima parte de ellas.

Destacar la importancia de definir bien las condiciones en que se van a llevar a cabo las simulaciones, las condiciones y propiedades de los límites y espacio que rodea a la antena, las unidades en que vamos a trabajar y el rango de frecuencias en que se va a llevar a cabo la simulación. También es importante que las simulaciones se completen, es decir que la energía de la señal de excitación baje a -80 decibelios. Si el programa da un error por inestabilidad en la simulación la solución es utilizar una malla que se adapte a la morfología de la antena.

## 8.3 CONTRUCCIÓN Y MEDIDA

La construcción de ambas antenas ha sido muy rápida y sencilla puesto que las dos eran diseños muy básicos. Probablemente lo más trabajoso del trabajo de construir la antena haya sido dibujar los planos de las antenas en AUTOCAD, una vez que se tenían los planos se exportaban a la fresadora y tras unos pequeños ajustes ésta realizaba la antena automáticamente.

Hubiera sido mejor haber fabricado dos antenas iguales de cada modelo para que la medida artesana de la directividad fuera más verídica.

Las medidas de adaptación realizadas con el analizador de redes han dado peores resultados que las realizadas con el ordenador, sin embargo la medida de directividad que se hizo con el mismo dio unos resultados bastante fieles a lo que se había obtenido en la simulación.

## 8.4 CONCLUSIÓN

Me ha parecido un proyecto interesante para los conocimientos de la materia de los que disponía.

El uso de este tipo de antenas está cada vez más difundido gracias en gran parte a su simplicidad en la fabricación y bajo coste. El número de aplicaciones es tan alto como la ingeniosidad del diseñador.

## 8.5 LÍNEAS FUTURAS

Limitándose a las condiciones en que se han construido las dos antenas del proyecto en cuanto a conocimientos previos de la materia, se podría proponer realizar el diseño de otras antenas de parche con diferente configuración como antena de parche circular para comparar con los resultados obtenidos en este proyecto. También se podría realizar algún diseño más complejo como podía ser una antena de parche que resonara a dos frecuencias diferentes o intentar aumentar ese ancho de banda aun conociendo las limitaciones de las antenas de parche.

## 8.6 VALORACIÓN ECONOMICA

El coste de la realización de éste proyecto sería de 706 euros con IVA, desglosando ésta cantidad tendríamos una placa de sustrato FR4 de tamaño D-A4 de la marca LPKF con la que se fabrica las dos antenas (20 euros), dos conectores SMA ( $2 \cdot 6 = 12$  euros), cinco horas de trabajo de técnico ( $5 \cdot 30 + \text{IVA} = 174$  euros) y 5 horas de alquiler de los aparatos de medida y fabricación (500 euros).

Evidentemente es un coste muy elevado para la fabricación de dos antenas de parche el cual no es muy fiel ya que no tiene mucho sentido alquilar un equipo tan caro para fabricar solo dos antenas y realmente se rentabilizaría su alquiler si se fabricase un mayor número de ellas.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

Jean Francois Zürcher and Fred E. Gardiol, Broadband Patch Antennas, Artech House

David R.M. Pozar, Microwave and RF Design of Wireless Systems, Wiley (2000)



